This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Roessler

Elektromotoren für Gleichstrom

Digitized by Google

Library
of the
University of Wisconsin

Digitized by Google

Digitized by Google

Elektromotoren für Gleichstrom.

Von

G. Roessler,
Professor an der Königl. Technischen Hochschule zu Berlin.

Mit 49 in den Text gedruckten Figuren.

Zweite verbesserte Auflage.

Berlin.
Verlag von Julius Springer.
1902.

Digitized by Google

Alle Rechte, insbesondere das der
Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.

Digitized by Google

94830
MAR 22 1906

TC B
.R62

6977216

Vorwort.

Das vorliegende Buch bildet die erweiterte Ausarbeitung eines Cyklus von Vorträgen, die ich im Sommer 1898 vor einem Kreise von Maschinen-Ingenieuren in der Technischen Hochschule zu Berlin gehalten habe. Der Zweck dieser Vorträge war, dem Ingenieur, welcher Gleichstrom-Elektromotoren in seinen Anlagen verwendet, die Betriebseigenschaften derselben und deren wissenschaftliche Grundlagen in möglichst einfacher, aber doch streng wissenschaftlicher Weise vorzuführen und zu begründen. Die Darstellung ist deshalb der Denkweise des mechanisch geschulten Verstandes möglichst angepaßt und stützt sich nur auf die bekanntesten physikalischen und mechanischen Grundsätze. Auf mathematische Eleganz habe ich Verzicht geleistet und selbst einfache algebraische Zwischenoperationen gescheut, weil diese den Boden der natürlichen Vorgänge verlassen und wie ein Tunnel durch einen Berg den Weg zwar zu kürzen im Stande sind, dafür aber auch häufig genug den Zusammenhang zwischen Ausgangspunkt und Ziel verdunkeln und beide unvermittelt aneinandersetzen.

Um das Buch gerade auch dem außerhalb der speziellen Interessen des Elektrotechnikers Stehenden zugänglich zu machen, habe ich den Umfang möglichst eingeschränkt und überall nur das grundsetzlich Wichtige hervorgehoben. Spezielle Ausführungen und Einrichtungen dagegen, wie z. B. die verschiedenen Systeme der Ankerwickelungen oder die vielen praktischen vorkommenden Variationen in der Gestaltung der Feldmagnete sind nur angedeutet, aber nicht ausführlich be-

Digitized by Google

schrieben, in der Annahme, daß ihr Verständnis auf der gegebenen Grundlage vorkommenden Falles dem Leser leicht wird.

Da die Elektromotoren ihrer inneren Natur nach auch Stromerzeuger sind, so ist der Besprechung eines jeden Motortypus diejenige des entsprechenden Dynamotypus unmittelbar angeschlossen; sachlich notwendig war dies für die Betrachtung der Methoden der elektrischen Bremsung und der Kraftrückgabe. Das Buch behandelt also eigentlich Elektromotoren und Dynamomaschinen. In den Titel sind indes die Dynamomaschinen nicht aufgenommen, um den besonderen Zweck des Buches klar hervortreten zu lassen.

Der ersten Auflage des vorliegenden Buches habe ich als eine in gleicher Art abgefaßte Fortsetzung ein Buch über „Elektromotoren für Wechselstrom und Drehstrom“ im Juni 1901 folgen lassen.

Berlin, Juli 1902.

G. Roessler.

Digitized by Google

Inhalt.

I. Grundgesetze des elektrischen Stromes.

	Seite
Begriff der Stromstärke	1
Begriff der elektromotorischen Kraft	2
Begriff des Widerstandes	2
Das Ohmsche Gesetz	2
Das Ampère	3
Ampèremeter	3
Das Ohm	4
Das Volt	6
Voltmeter	7
Widerstandsmessung	8
Arbeitsleistung des Stromes	8
Das Watt	9
Kilowatt und Pferdestärke	9
Wärmeentwicklung des Stromes	10

II. Grundgesetze des Magnetismus.

Kraft von Masse auf Masse	12
Masseneinheit	12
Magnetisches Feld	13
Feldstärke	13
Begriff der Kraftlinien	14
Kraftliniendichte als Maß der magnetischen Kraft	15
Wirkung von Eisen im Felde	16
Hufeisenmagnet ohne und mit Anker	17
Messung der Feldstärke	18
Kraftlinien stromdurchflossener Spulen	19
Geschlossene Form der Kraftlinien	21
Magnetisierende Kraft und magnetische Induktion	21
Magnetisierungskurve von weichem Eisen	22
Praktisch verwendete Magnetformen	23

Digitized by Google

Seite
Berechnung der Ampèrewindungszahl der Magnetisierungsspulen . . 25
Analogie zwischen magnetischem Kreis und elektrischem Stromkreis . 28
Öffnungsfunken 29
Berechnung der magnetischen Streuung 30
Beispiel für die Berechnung der Ampèrewindungszahl eines Magnetgestelles 31
Kritik der Methode 35
Einseitiger magnetischer Zug bei elektrischen Maschinen 36

III. Drehmoment und Arbeitsleistung eines Gleichstrom-Ankers.

Elektromagnetische Kraft eines stromdurchflossenen Leiters im magnetischen Felde, Größe, Richtung 40
Zugkraft eines Ringankers mit einer Windung 41
Bedeutung der radialen magnetischen Kraftkomponenten 43
Verteilung derselben um den Anker 44
Bedingung für die Verteilung der Stromrichtung um den Anker . . 45
Kommutator und Bürsten als Steuerungsorgane für den Strom, Schaltung bei zwei- und mehrpoligen Motoren 46
Drehmoment von vollbewickelten Ankern 49

IV. Elektromotorische Gegenkraft und Beziehungen zwischen Motor und Generator.

Die E.M. Gegenkraft, innere Begründung ihres Auftretens 52
E.M.K. bei Antrieb des Ankers von außen 53
Wechselbeziehungen zwischen Motor und Generator 54
Größe der E.M.K. des Ankers 55
E.M.K. eines einzelnen Ankerleiters 56

V. Magnet-Motor und -Generator.

Stromverteilung mit Parallelschaltung, Betrieb mit konstanter Spannung 57
Anlauf, Anlaßwiderstände 58
Arbeitsbilanz des laufenden Motors. 59
Wirkungsgrad 61
Tourenabfall bei wachsender Belastung 62
Der Magnetmotor als Generator, Spannungscharakteristik, Triebkraft . 63

VI. Nebenschluſs-Motor und -Generator.

Schaltung der Erregerwicklung 64
Arbeitsbilanz des laufenden Motors, Zahlenbeispiel 65

Digitized by Google

Seite
Tourenabnahme bei wachsender Belastung 68
Regulierung durch Schwächung des Magnetfeldes, Zahlenbeispiel . . 68
Kombinierte Anlasser und Regulatoren 70
Regulierung durch Umschaltung der Ankerspulen 72
Tourenverminderung durch Vorschaltwiderstände vor dem Anker . 73
Automatische Anlasser 74
Der Nebenschlußmotor als Dynamo, Bedingungen für die Selbsterregung 75
Der Vorgang der Selbsterregung 76
Spannungscharakteristik, Regulierung der Spannung 78

VII. Hauptstrom-Motor und -Generator.

Schaltung der Erregerwicklung 80
Größe der Anlaufszugkraft 81
Arbeitsbilanz des laufenden Motors 82
Änderung der Tourenzahl mit der Belastung 82
Regulierung durch Vorschaltwiderstände 84
Regulierung durch Umschaltung der Feldmagnetspulen 86
Regulierung durch Umschaltung der ganzen Motoren 90
Magnetische Funkenlöschung 91
Der Hauptstrom-Motor als Generator, Bedingungen für die Selbsterregung 91
Spannungscharakteristik 92
Kraftübertragung zwischen Hauptstrom-Generator und -Motor . . . 92
Vergleich der Betriebseigenschaften von Nebenschluß- und Hauptstrom-Motor 94

VIII. Kompound-Motor und -Generator.

Regulierprinzip des Kompoundmotors, Aufwand an Wicklungsmaterial 96
Der Kompoundmotor als Generator, Selbstregulierung der Spannung, Überkompoundierung 97
Arbeitsbilanz des Kompoundgenerators, Zahlenbeispiel 99

IX. Elektrische Bremsung, Kraftrückgabe, Umsteuerung.

Bremsung durch Umschaltung eines Motors zum Generator, Verhalten der drei Typen 100
Die Wirbelstrombremse 101
Stromrückgabe in das Netz 102
Parallelschaltung von Nebenschluß-Generatoren, Stabilität 104
Stromrückgabe bei Umkehr der Bewegung 105
Umsteuerung 106

Digitized by Google

Seite

X. Funkenbildung an Bürsten und Kommutator.

Ursache der Funkenbildung 107
Stromfluß einer Spule beim Passieren der Bürste 108
Mittel zur Vermeidung der Funkenbildung beim Motor 109
Mittel zur Vermeidung der Funkenbildung beim Generator 111

XI. Ankerrückwirkung.

Magnetfeld eines stromdurchflossenen geraden Leiters 113
Magnetfeld der äußeren achsialen Leiter eines Ankers 114
Kombination des Ankerfeldes mit dem Felde der Pole, Verschiebung des resultierenden Feldes gegen das letztere 116
Spezialfall sinusartiger Verteilung der Intensitäten aller drei Felder 119
Meßmethode für die wahre Intensitätsverteilung 120
Gegenwindungen und Querwindungen und ihre Wirkung 121

XII. Wirbelströme und Hysteresis.

Ursachen und Bestimmungsfaktoren der Wirbelströme 124
Hydraulische Analogie 125
Mittel zur Verminderung der Wirbelströme 126
Magnetische Hysteresis 128

Anhang: Das absolute Maßsystem.

Willkürliche Einheiten 130
Ableitung der elektrischen und magnetischen Einheiten aus dem kg und dem kgm 131
Absolute mechanische, elektrische und magnetische Einheiten . . . 133
Beziehungen der letzteren zum Volt, Ampère, Ohm und Watt . . 134
Umrechnungsfaktoren 135
Physikalische Reproduktion der elektrischen Einheiten 135

Digitized by Google

I. Grundgesetze des elektrischen Stromes.

Die kontinuierliche Bewegung der Elektricität durch einen Leiter, welche man als elektrischen Strom bezeichnet, wird, wie die Strömung einer Flüssigkeit, hervorgerufen und unterhalten durch eine treibende mechanische Kraft. Mit dem Vorbehalte einer späteren genaueren Definition sei aus dem elektrischen Fluidum ein gewisses Quantum herausgeschöpft gedacht, welches als „Einheit der elektrischen Masse" bezeichnet werde. Die Menge J der Elektricität, welche sekundlich durch einen Leiterquerschnitt fließt, oder die „Stromstärke", ist dann offenbar proportional der Kraft F, die jede Masseneinheit vorwärts treibt, und dem Querschnitt q, welcher der Strömung dargeboten wird. Bei einem Flüssigkeitsstrome hinge die Durchflußmenge noch ab von der Gestalt der Rohre, von Krümmungen u. s. w. Der elektrische Strom dagegen ist von der Gestalt der Leiter unabhängig, wird aber unter sonst gleichen Umständen wesentlich beeinflußt durch ihren Stoff. Diese Eigenschaft kann man leicht durch die Annahme erklären, daß die verschiedene mechanische und chemische Beschaffenheit der Körper im letzten Grunde in einer verschiedenen Gestalt und Lagerung oder Bewegung der kleinsten Teilchen besteht und der elektrische Strom, indem er sich zwischen den Teilchen hindurchdrängt, verschiedenen Widerstand findet. Faßt man diesen Einfluß des Stoffes in einer Materialkonstanten λ zusammen, so ergibt sich also

$$J = \lambda q F.$$

Nach dieser Gleichung kann λ als die „specifische Leitungsfähigkeit" des Materials bezeichnet werden; in der Tat entspricht λ diesem Begriff, denn die Stromstärke J wird bei gleicher treibender Kraft F

Digitized by Google

und gleichem Querschnitt q um so größer, je grösser λ ist. Auch den reziproken Wert von λ

$$c = \frac{1}{\lambda}$$

kann man einführen und den „specifischen Leitungswiderstand“ nennen. Es wird dann

$$J = \frac{1}{c} q F$$

und

$$F = \frac{c}{q} J.$$

Wichtiger als die Kenntnis der treibenden Kraft F ist für die Elektrotechnik aber die Kenntnis der Arbeit E, welche diese Kraft leistet, wenn die von ihr getriebene Masseneinheit einen Leiter von bestimmter Länge l durchströmt. Da nach bekanntem mechanischen Grundsatze

$$E = F . l$$

ist, so ergibt sich für E der Wert

$$E = c \frac{l}{q} . J \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Diese Gleichung ist bekannt unter dem Namen: das Ohmsche Gesetz. E heifst konventionell die „Elektromotorische Kraft“, obgleich es nach obigem eigentlich nicht die Kraft, sondern die Arbeit bedeutet, welche beim Durchtreiben der elektrischen Masseneinheit durch das Leiterstück l aufzuwenden ist. Für Elektromotorische Kraft soll fortan die abkürzende Bezeichnung E.M.K. benutzt werden. Der Ausdruck

$$c \frac{l}{q} = w \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

wird bezeichnet als der „Widerstand“ des Leiters. Diese Benennung ist berechtigt, weil nach Gl. 1 die E.M.K., die zur Herstellung eines bestimmten Stromes aufzuwenden ist, um so größer sein muß, je größer der Wert von w ist. Demnach wird

$$E = J w.$$

Das Ohmsche Gesetz liefert also eine Bedingung, welche die Stromquelle erfüllen muß, wenn in einem Leiter von gewisser in Gestalt von w gegebener konkreter Eigenart eine Stromstärke J erzeugt werden soll. Diese Bedingung drückt sich aus in der Arbeit E,

Digitized by Google

welche die Stromquelle im stande sein muß, auf die elektrische Masseneinheit beim Durchfließen des Leiters zu übertragen.

Offenbar läßt sich dieses Gesetz aber erst dann für die Technik fruchtbar verwerten, wenn allgemein anerkannte und leicht reproduzierbare Einheiten vorhanden sind, in denen die in dem Gesetze vorkommenden Größen ausgedrückt und gemessen werden können. Bei der gewaltigen Höhe der Kapitalien, welche der Vertrieb von Elektricität heutzutage in Umsatz bringt, ist die Aufstellung und gesetzliche Festlegung solcher Einheiten auch von großer volkswirtschaftlicher Bedeutung.

Die Einheit der Stromstärke. Da der elektrische Strom sinnlich nicht wahrgenommen werden kann, so läßt sich die Stromstärke nicht mit mechanischen Hilfsmitteln direkt messen. Man ist gezwungen, eine der sinnlich wahrnehmbaren Wirkungen dazu zu benutzen. Für die Aufstellung einer Einheit ist am zweckmäßigsten die Benutzung der elektrochemischen Wirkung und speziell die Zersetzung von Metallsalzlösungen. Das Gesetz für diesen Vorgang ist besonders einfach: Die ausgeschiedenen Metallmengen sind der Stromstärke und der Zeit proportional und lassen sich mit der chemischen Wage leicht mit größter Genauigkeit bestimmen. Für die Feststellung der Stromeinheit ist durch internationale Einigung eine Lösung von Silbernitrat gewählt worden, in welche für die Zuführung und Ableitung des Stromes Silber-Elektroden eintauchen. (Silber-Voltameter.) Als Einheit ist derjenige Strom festgesetzt, welcher in einem solchen Apparate sekundlich 1,118 mg Silber aus der Lösung niederschlägt. Die Stärke dieses Stromes heißt 1 Ampère.

Das oben erwähnte elektrochemische Grundgesetz liefert nun eine prinzipiell einfache Methode, beliebige Stromstärken in dieser Einheit zu messen. Leitet man nämlich den zu messenden Strom durch ein Silber-Voltameter, und findet man darin eine sekundlich niedergeschlagene Silbermenge von G mg, so ist der Strom offenbar

$$J = \frac{G}{1{,}118} \text{ Ampère.}$$

Ein solches Verfahren ist indes nur als Feinmeßmethode geeignet; für die Praxis ist es zu umständlich und zeitraubend.

Die in der Technik verwendeten „Ampèremeter“ benutzen meist die elektromagnetische Kraft des Stromes, d. h. die Zugkraft, welche

Digitized by Google

ein stromdurchflossener Draht — am besten eine Spirale oder „Spule“ — auf ein benachbartes Eisenstück ausübt. Hängt man z. B. einen dünnen Eisendraht oberhalb einer Spule an einem Hebel auf und schickt durch die Spule Strom, so zieht sie den Eisendraht um so tiefer in sich hinein, und der Hebel dreht sich um so mehr, je stärker der Strom ist. Um die Drehung des Hebels zu messen, kann an der Achse desselben ein Zeiger angebracht werden, welchen man vor einer festen Skala spielen läßt. Die Eichung eines solchen Instrumentes läßt sich leicht bewerkstelligen, indem man den ihm zugeführten Strom auch durch ein Silbervoltameter schickt und an dem Skalenteil, über welchem sich der Zeiger dann einstellt, den mit dem Voltameter gemessenen Strom vermerkt. Dasselbe Verfahren wäre für den ganzen Meßbereich des Ampèremeters so häufig zu wiederholen, bis genügend viele Punkte der Skala untersucht sind. Bei praktischer Ausführung der Eichung wird man runde Werte der Stromstärke benutzen und daraus eine Skala bilden. Unsere modernen Fabriken elektrischer Meßinstrumente verwenden allerdings das Silber-Voltameter nicht mehr, sondern haben einfacher zu handhabende Normale, die aber ihrerseits durch das Silber-Voltameter als Urnormal kontrolliert werden müssen. Die physikalisch-technische Reichsanstalt hat die Aufgabe, diese Kontrolle auf Wunsch vorzunehmen und amtlich zu beglaubigen. Sie benutzt dazu eigene Normale, die sie mit dem Silber-Voltameter vergleicht.

Die Einheit des Widerstandes. Da der Widerstand eines Leiters gegenüber dem elektrischen Strom nur durch die Dimensionen l und q und die Eigentümlichkeit des Materials (c), also durch ganz konkrete Eigenschaften desselben gegeben ist, so pflegt man das Wort Widerstand nicht allein für den abstrakten Begriff des Widerstehens, sondern auch für den konkreten Begriff des Widerstand bietenden Leiters selbst anzuwenden und einen Leiter direkt als einen Widerstand zu bezeichnen. In diesem Sinne kann die Einheit des Widerstandes theoretisch durch jedes beliebige, willkürlich gewählte Drahtstück repräsentiert werden, und für die Wahl des Materials können praktische Gründe die Entscheidung geben. Man hat sich für die Benutzung von Quecksilber entschieden, weil dieses durch Destillation am leichtesten chemisch rein herzustellen ist und bei ihm infolge seines flüssigen Zustandes Verschiedenheiten des molekularen Gefüges nicht möglich sind, welche den Widerstand beeinflussen könnten. Als Widerstandseinheit ist ein

Digitized by Google

Quecksilberfaden von 1 qmm Querschnitt und 1,063 m Länge festgesetzt. Diese Einheit heißt 1 Ohm.

Die Messung eines Widerstandes d. h. der Vergleich mit dem genannten Normal von einem Ohm kann leicht unter Benutzung des Ohmschen Gesetzes geschehen. Man braucht nur das Normal-Ohm w_1 und den zu messenden Widerstand w_x nach einander an dieselbe Stromquelle anzuschließen und die Ströme J_1 und J_x mit einem Ampèremeter zu bestimmen. Wenn die E.M.K. der Stromquelle E, d. h. die Arbeit, welche diese auf die elektrische Masseneinheit übertragen kann, inzwischen dieselbe bleibt, so ergeben sich für die beiden Fälle die Gesetze

$$E = J_1 w_1$$

und

$$E = J_x w_x ,$$

und es wird daher

$$w_x = \frac{J_1}{J_x} w_1 ,$$

d. h. man erhält w_x direkt in Ohm, da $w_1 = 1$ ist, wenn man die in Ampère gemessenen Stromstärken durch einander dividiert. Vorausgesetzt ist hier allerdings, daß beide Widerstände w_1 und w_x allein in den Stromkreisen vorhanden sind. Diese Bedingung ist aber niemals in reiner Form zu erfüllen, da alle Stromquellen: Batterieen, Akkumulatoren etc. und auch das Ampèremeter selbst Widerstand haben; man kann ihrer Erfüllung aber nahe kommen, wenn man die Verhältnisse so einrichtet, daß die übrigen Widerstände gegen w_1 und w_x verschwindend klein sind.

Die geschilderte Methode ist trotzdem als praktisches Verfahren zur Messung von Widerständen nicht gebräuchlich; sie möge an dieser Stelle mehr als Beispiel einer Anwendung des Ohmschen Gesetzes und zur Fixierung der darin vorkommenden Begriffe dienen. Wenn man nach diesem oder einem ähnlichen Verfahren einen Widerstand von bekannten Dimensionen l und q bestimmt hat, so kann man nach Gl. 2 leicht den specifischen Widerstand c berechnen. Man erhält, wenn man l in Metern und q in Quadratmillimetern ausdrückt,

für Kupfer $c = {}^1/_{50}$ bis ${}^1/_{60}$
„ Eisen $c = 0{,}1$
„ Neusilber $c = 0{,}16$ bis $0{,}36$.

Umgekehrt kann man mit Hilfe dieser Werte dann auch Wider-

Digitized by Google

stände von Drähten oder Spulen mit beliebigen anderen Längen und Querschnitten nach Gl. 2 in Ohm berechnen.

Die Einheit der Elektromotorischen Kraft. Nachdem die Einheiten für Strom und Widerstand festgelegt sind, steht die Wahl der Einheit der E.M.K. nicht mehr frei, wenn man das Ohmsche Gesetz ohne Übergangsfaktor anwenden will. Man wird diejenige E.M.K. als die Einheit bezeichnen, welche in einem Drahte von einem Widerstande von 1 Ohm einen Strom von 1 Amp. erzeugt. Diese Einheit heißt 1 Volt. Das Ohmsche Gesetz gestattet dann, von den drei Größen E, J und w in einfachster Weise die eine auszurechnen, wenn die anderen bekannt sind. Ein Stromkreis von 100 Ohm Widerstand bedarf z. B., wenn ein Strom von 10 Amp. in ihm erzeugt werden soll, einer E.M.K. von $100 \cdot 10 = 1000$ Volt.

Hier erscheint es am Platze, die Synonymik der beiden Begriffe: Elektromotorische Kraft und Spannung näher zu erklären. Bisher ist ausschließlich der erstere Ausdruck für die Arbeit gebraucht worden, welche die Stromquelle auf die elektrische Masseneinheit beim Durchfließen eines Leiters überträgt, weil in dem Wort „elektromotorisch" die Bedeutung des treibenden Agens enthalten ist. Man pflegt diesen Ausdruck aber nur zu benutzen für die Arbeit, welche die Masseneinheit beim Durchfließen eines ganzen, in sich geschlossenen Stromkreises leistet, während man diejenige, welche beim Durchströmen eines begrenzten Leiters als eines Teiles des Stromkreises zur Auslösung kommt, als die Spannung bezeichnet. Auch diese bezieht sich wieder auf die Masseneinheit. Im folgenden soll eine E.M.K. stets mit E, eine Spannung mit E_p bezeichnet werden.

Wird z. B. an eine Dynamomaschine von 0,1 Ohm Widerstand eine Lampenbatterie von 100 Lampen angeschlossen, welche 2 Ohm Widerstand hat, so ist der Widerstand des gesamten Stromkreises $0{,}1 + 2 = 2{,}1$ Ohm. Soll dadurch ein Strom von 50 Amp. geschickt werden, so muß die Maschine eine Elektromotorische Kraft erzeugen von 50 Amp. $\cdot$ 2,1 Ohm $= 105$ Volt. An der Lampenbatterie besteht dann aber nur eine Spannung von $50 \cdot 2 = 100$ Volt. Die übrigen 5 Volt gehen in der Dynamomaschine verloren, weil das Durchfließen von deren Wickelung ebenfalls elektrische Arbeit kostet. Eine mechanische Analogie mit dem oben betrachteten Beispiel bietet eine Dampfmaschine mit Kessel und Verbindungsleitung. Der

Digitized by Google

wirklich an der Lampenbatterie vorhandenen Spannung E_p entspricht dabei die Admissionsspannung des Dampfes, der E.M.K. der Dynamo die Kesselspannung, und dem Spannungsverlust in der Wickelung der Dynamo entspricht der Spannungsverlust in der Dampfleitung.

Das Ohmsche Gesetz, welches die Berechnung einer Spannung E_p an einem Leiter ermöglicht, wenn dessen Widerstand w und der durchfließende Strom J bekannt sind, kann auch als Grundlage für eine Messung von E_p benutzt werden, wenn man weder w noch J kennt. Man überzeugt sich davon, wenn man den in Fig. 1 dar-

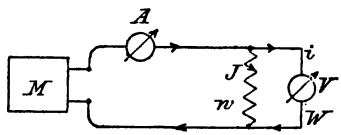


Fig. 1.

gestellten Stromkreis betrachtet, in welchem M die Stromquelle, w den genannten Widerstand und A das den Strom J messende Ampèremeter darstellt. Verbindet man nämlich die Klemmen von w mit den Klemmen eines zweiten Ampèremeters (V) und bildet dadurch eine Abzweigung zu dem in w einfließenden Strom, so gibt man dadurch dem Ampèremeter dieselbe Spannung E_p, welche an w herrscht, und die Stärke des Zweigstromes, der in das Ampèremeter fließt, muß sich ebenfalls nach dieser Spannung richten. Offenbar kann dabei E_p ebensogut aus w und seinem Strome J, wie aus dem Widerstand des Ampèremeters W und dessen Strom i berechnet werden, und es besteht die Gleichung:

$$E_p = J w = i W.$$

Ist der Ampèremeter-Widerstand W in Ohm bekannt, so ergibt die Multiplikation der Ampèremeter-Angaben i mit W direkt die zu messende Spannung in Volt, und damit ist eine einfache Methode der Spannungsmessung gegeben. Natürlich wird man aber dem Benutzer solcher Spannungs-Ampèremeter jene Multiplikation ersparen und schon das Resultat derselben auf der Skala angeben. Auf diese Weise wird das Ampèremeter zu einem Voltmeter, welches, an beliebige Klemmen gelegt, die Spannung zwischen denselben direkt anzeigt.

Digitized by Google

Eine hydraulische Analogie zu diesem Meßverfahren würde man schaffen, wenn man z. B. die Pressung des einer Wasserkraftmaschine zugeführten Druckwassers nicht mit dem Manometer, sondern dadurch bestimmte, daß man vor der Maschine vom Hauptrohre ein dünnes Nebenrohr abzweigte und darin einen Wassermesser einschaltete. Veränderungen in der Pressung würden dann auch eine proportionale Veränderung der abgezweigten Wassermenge zur Folge haben. Wie man nun bei der Wassermessung ein möglichst dünnes Zweigrohr benutzen würde, um Wasser zu sparen, so stellt man auch die Spulen der Voltmeter aus vielen Windungen dünnen Drahtes her, damit diese dem Strom einen großen Widerstand bieten und der abgezweigte Strom nur gering wird. In allen Anlagen der Starkstromtechnik sind die Voltmeterströme stets so klein, daß sie gegenüber den anderen Strömen vernachlässigt werden können.

Fig. 1 enthält außer dem Voltmeter V auch noch ein Ampèremeter A, direkt in den nach w fließenden Strom geschaltet, so daß man erkennt, wie einfach die Messung der grundlegenden Größen Spannung und Stromstärke in der Elektrotechnik ist. Dieselbe Schaltung kann man auch für eine ganze Licht- oder Motorenanlage anwenden, indem man die letztere wie einen einfachen Widerstand w behandelt und die Hauptschienen des Schaltbrettes, an welches sie angeschlossen ist, als die Klemmen dieses Widerstandes betrachtet.

Die in Fig. 1 dargestellte Schaltung kann auch zur Messung des Widerstandes w selbst benutzt werden. Da das Voltmeter die Spannung E_p an diesem Widerstande und das Ampèremeter die Stromaufnahme desselben anzeigt, so ist nach dem Ohmschen Gesetze

$$w = \frac{E_p}{J}.$$

Genau genommen mißt freilich das Ampèremeter A außer J den in das Voltmeter fließenden Zweigstrom i noch mit; doch kann von der Berücksichtigung desselben nach der obigen Bemerkung abgesehen werden.

Die Einheit der Arbeitsleistung. Die Arbeit A, welche ein Strom beim Durchfließen eines Leiters sekundlich leistet, folgt direkt aus E_p und J. Nach der Definition von E_p als der Arbeit einer Masseneinheit und von J als der Anzahl aller Massen, welche sekundlich durch einen Querschnitt strömen, ergibt sich die sekund-

Digitized by Google

liche Arbeit aller Massen als das Produkt von E_p und J. Es ist

$$A = E_p \,.\, J. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (3)$$

Die Einheit dieser Leistung, welche auch als der „Effekt" des elektrischen Stromes bezeichnet wird, folgt dabei unmittelbar aus den Einheiten von Spannung und Stromstärke und tritt dann in einem Leiter auf, wenn durch ihn ein Strom von 1 Amp. fließt und an seinen Klemmen eine Spannung von 1 Volt vorhanden ist. Diese Einheit nennt man 1 Volt-Ampère oder 1 Watt. 1000 Watt heißen 1 Kilowatt. Gl. 3 ergibt also A in Watt, wenn man E_p in Volt und J in Amp. einführt.

Die Beziehung zwischen dieser Einheit der elektrischen Arbeit und der mechanischen Arbeitseinheit von einer Pferdestärke ist derart, daß

$$736 \text{ Watt} = 1 \text{ P.S.} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (4)$$

zu setzen sind. 1 P.S. beträgt also rund $^3/_4$ Kilowatt.

Eine Berechnung des Übergangsfaktors 736 läßt sich an dieser Stelle nicht geben, weil die oben aufgestellte Definition des Ampère, Ohm und Volt eine rein äußerliche und nicht wissenschaftlich begründet worden ist. Der wissenschaftliche Grund für die Wahl dieser Einheiten liegt in ihrer Herleitung aus einem „absoluten elektromagnetischen Maßsystem", bei welchem die Gesetze der mechanischen Kräfte, die Ströme auf Magnete ausüben, benutzt werden, um aus der Einheit der mechanischen Kraft Einheiten für die elektrischen und magnetischen Größen abzuleiten. Eine ausführliche Darstellung dieses absoluten Maßsystems wird am Schlusse des Buches als Anhang folgen. Die Wahl der oben benutzten Definitionsweise rechtfertigt sich nicht nur durch ihre größere Einfachheit, sondern auch deswegen, weil sie auch bei der reichsgesetzlichen Festlegung der elektrischen Einheiten gewählt wurde[1]).

---

[1]) Das Gesetz, betreffend die elektrischen Maßeinheiten, ist in No. 138 des Reichsanzeigers am 14. Juni 1898 veröffentlicht und an diesem Tage in Kraft getreten. (S. auch Elektrotechnische Zeitschrift 1898, S. 195 und 294.) Dazu gehören die von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt entworfenen in No. 110 des Reichsanzeigers vom 9. Mai 1901 veröffentlichten Ausführungsbestimmungen nebst Erläuterungen. (S. auch E. T. Z. 1901, S. 435, 471 und 531.) Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt hat außerdem eine Prüfordnung für elektrische Meßgeräte und Vorschriften für die Ausrüstung elektrischer Prüfämter als Broschüre im

Digitized by Google

Als Beispiel für das Grundgesetz der elektrischen Arbeitsleistung möge der Wirkungsgrad eines Motors berechnet werden, welcher bei 100 Volt Spannung und einer Stromaufnahme von 87,5 Amp. 10 PS_e liefere. Da 10 P.S. = 7360 Watt sind und die Effektaufnahme bei $E_p = 100$ Volt und $J = 87{,}5$ Amp. sich auf $E_p J = 8750$ Watt beläuft, so wird der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{7360}{8750} = 84{,}1\ \%.$$

Drückt man in Gl. 3 nach dem Ohmschen Gesetz E_p durch J und w, oder J durch E_p und w aus, so erhält man für die Arbeitsleistung auch die beiden Gleichungen

$$A = \frac{E_p^2}{w} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

und

$$A = J^2 w \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Gl. 6 ist diejenige, welche allgemein benutzt wird, wenn festgestellt werden soll, welche elektrische Arbeit ein Widerstand w, z. B. die Ankerwickelung oder die Schenkelspulen eines Motors sekundlich verschlucken, wenn sie von einem Strome J durchflossen werden. Diese Arbeitsleistung, welche nur zum Durchtrieb des Stromes durch w aufzuwenden ist, muß natürlich in dem Auftreten einer andern Energieform ihr Äquivalent finden: sie setzt sich bekanntlich um in Wärme. Der Vorstellung kann diese Erscheinung wiederum am einfachsten dadurch zugänglich gemacht werden, daß man annimmt, die elektrischen Massen erführen Reibung, indem sie zwischen den mechanischen Massenteilchen des Leiters hindurchgepreßt werden, und diese Reibung erzeugte die Wärme. Aus der exakten wissenschaftlichen Definition der elektrischen Einheiten folgt, daß jedes Watt 0,24 Gramm-Kalorien äquivalent ist. Ein Strom von J Amp. erzeugt also in einem Widerstand von w Ohm sekundlich

$$Q = 0{,}24 \cdot J^2 w \text{ g cal.} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

Die gefährdende Erhitzung, welche diese Wärmeerzeugung zur Folge hat, und der damit verbundene Arbeitsverlust bilden die Haupt-

---

Verlage von Julius Springer 1902 amtlich herausgegeben; hierin sind die Bedingungen enthalten, unter denen elektrische Meßinstrumente auf Wunsch ihrer Besitzer im Deutschen Reiche amtlich geprüft werden.

Digitized by Google

gesichtspunkte für die Berechnung des Querschnittes q der Wickelungen von Motoren und Generatoren. Da nach Gl. 2 der Widerstand um so kleiner wird, je größer q, müssen ceteris paribus Arbeitsverlust und Erhitzung um so geringer werden, je dicker die stromdurchflossenen Leiter sind, wie man ja auch durch ein weites Rohr unter geringerem Energieaufwand Flüssigkeiten hindurchpressen kann als durch ein enges. Durch die Spulen des feststehenden Magnetgestells von elektrischen Maschinen pflegt man pro qmm Querschnitt nicht mehr als 1—3 Amp. zu führen, während man die Wickelung des rotierenden Ankers je nach dem Grade der Ventilation mit 3 bis 10 Amp. „Stromdichte" belasten kann.

Aus Gl. 6 erkennt man, daß im Gegensatze zu der Forderung, welche oben für das Voltmeter aufgestellt wurde, die Spule eines Ampèremeters nur kleinen Widerstand w, also möglichst wenige Windungen dicken Drahtes enthalten soll; denn, wenn das Stromintervall festgelegt ist, für dessen Messung das Ampèremeter zu dienen hat, so läßt sich die in ihm verloren gehende elektrische Arbeit nur dadurch herabdrücken, daß man w so klein wie möglich macht. Auch hier gilt wieder die Analogie mit einem Wasserstrome, denn auch ein Wassermesser muß auf möglichst geringen Widerstand konstruiert werden, damit er nur möglichst wenig von der vorhandenen Druckhöhe absorbiert. Die modernen elektrischen Volt- und Ampèremeter sind so eingerichtet, daß die in ihnen verloren gehende Arbeit nur verschwindend klein ist.

Digitized by Google

II. Grundgesetze des Magnetismus.

Es ist bekannt, daß eine drehbare Magnetnadel von einem ihr nahe gebrachten Magnet abgelenkt wird. Die Richtung der Drehung ist verschieden, je nachdem das eine oder das andere Ende des zweiten Magnets der Nadel genähert wird. Man erklärt sich dies durch das Vorhandensein je zweier entgegengesetzter Pole in beiden Körpern, welche mit magnetischen Massen entgegengesetzter Natur oder, mathematisch gesprochen, entgegengesetzten Zeichens angefüllt sind, und unterscheidet darnach positive oder nordmagnetische von negativen oder südmagnetischen Massen. Alle Experimente, welche man bei verschiedenster Gegenüberstellung von Magnet und Nadel machen kann, finden eine gemeinsame Erklärung, wenn man annimmt, daß alle Massen ungleichen Vorzeichens sich anziehen und alle Massen gleichen Vorzeichens sich abstoßen. Auch die Größe der Kraft, mit welcher Magnet und Nadel auf einander wirken, läßt sich exakt berechnen, wenn man die Hypothese benutzt, daß je zwei Massen m_1 und m_2, welche sich in der Entfernung r von einander befinden, die Kraft

$$F = \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

auf einander ausüben. Freilich mufs dabei zur Berechnung der Gesamtkraft endlicher Magnete auch die Verteilung der Massen im Innern derselben bekannt sein.

Die obige Formel für F dient zweckmäfsig als Ausgang für die Wahl einer passenden Einheit für die magnetische Masse. Nimmt man an, die beiden Massen seien einander gleich und $m_1 = m_2 = m$, so ist

$$F = \frac{m^2}{r^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

Digitized by Google

Man wird also diejenige magnetische Masse m als Einheit bezeichnen, welche auf eine gleiche Masse m in der Entfernung $r = 1$ die Kraft $F = 1$ ausübt, und kann dabei die Einheiten für r und F noch beliebig wählen. r wird allgemein gemessen in Centimetern, aber F nicht in Kilogrammen oder Grammen, sondern in den sogenannten „absoluten Krafteinheiten“ oder „Dynen“, welche den 980,6. Teil eines Grammes betragen[1]).

Mit diesen Festsetzungen ist indessen zunächst ein praktischer Gewinn noch nicht erzielt, da die Verteilung der magnetischen Massen im Eisen sich nur in wenigen Fällen mit einiger Annäherung theoretisch berechnen läßt und die direkte Messung der Kraft F oder eine Berechnung auf anderem Wege leichter ist als unter Benutzung von Gl. 8. Die Aufstellung einer Einheit der magnetischen Masse hat aber deswegen große wissenschaftliche Bedeutung, weil die Kraftwirkung, welche eine solche in der Nähe eines beliebigen Magnets erfährt, als ein eindeutiges Kriterium für die Stärke des letzteren betrachtet und zum Vergleich mit anderen Magnetsystemen benutzt werden kann.

Die Stärke eines Magnets spricht sich ganz allgemein aus in den Kraftwirkungen, welche benachbarte kleine Magnete oder Eisenstückchen durch ihn erfahren. Da solche Wirkungen in dem ganzen Raum, welcher den Magnet umgibt, vorhanden sind, so kann dieser Raum als mit magnetischen Kräften begabt betrachtet werden. Man bezeichnet ihn als ein magnetisches Feld. Als Maß für die Stärke dieses Feldes kann also diejenige Kraft gewählt werden, welche eine in obiger Weise definierte positive Masseneinheit oder ein „Einheitspol“ an beliebiger Stelle erfährt. Diese Kraft, in Dynen gemessen, heißt denn auch die „Feldstärke“ oder die „Intensität des Feldes“. Sie soll fortan mit $\mathfrak{B}$ bezeichnet werden.

Denkt man sich nun eine magnetische Masseneinheit auf einen kleinen materiellen Körper gebracht und diesen an einen beliebigen

---

[1]) Im „absoluten“ Maßsystem, welches als Grundeinheiten das Centimeter, das Gramm und die Sekunde benutzt, versteht man unter der Einheit der mechanischen Kraft diejenige, welche der materiellen Masse von 1 g in 1 Sekunde die Beschleunigung von 1 cm erteilt, während die technische Einheit der Kraft, 1 g, den Gravitations-Druck derselben Masse auf ihre Unterlage oder die auf diese Masse wirkende Erdkraft bedeutet. Die letztere gibt aber pro Sekunde eine Beschleunigung von 9,806 m = 980,6 cm und ist daher 980,6 mal so groß als die absolute Krafteinheit.

Digitized by Google

Ort des magnetischen Feldes gelegt, so wird er unter dem Einflusse der Kraft des letzteren in bestimmter Richtung bewegt werden. Die Linie, welche er dabei verfolgt, ist natürlich eine gerade, wenn das Feld von einem einzigen Pole gebildet wird; unter dem Einflusse mehrerer anziehenden und abstoßenden Pole aber wird sie im allgemeinen zu einer Kurve; man bezeichnet eine solche als eine Kraftlinie. Da nun an jeder Stelle eines Magnetfeldes eine Kraft wirksam ist, so muß man durch jeden Punkt desselben eine Kraftlinie legen können. Wird dies zeichnerisch für sehr viele Punkte durchgeführt, so erhält man ein vortreffliches Bild von dem magnetischen Zustand des Feldes. Dieses Bild kann aber auch experimentell in sehr einfacher Weise gewonnen werden, indem man Eisenfeilspäne auf eine über den

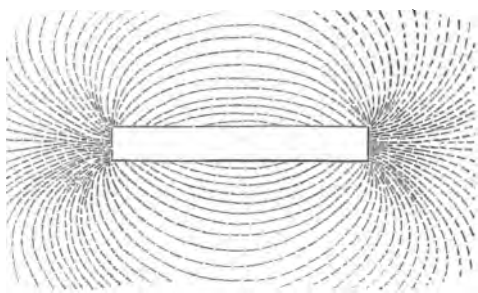


Fig. 2.

Magnet gelegte Platte streut. Wie sich die Nadel des Kompaß längs der magnetischen Kraft der Erde einstellt, so wird sich hier jedes Eisenteilchen in die Richtung der Kraft des Feldes legen.

In Fig. 2 ist das magnetische Feld eines geraden Stabmagnets in der geschilderten Weise dargestellt. Jede der darin gezeichneten Kraftlinien gibt also die Bahn an, welche eine magnetische Masseneinheit verfolgte, wenn sie auf einen Punkt des Feldes gelegt würde, durch den die betreffende Linie hindurchgeht. Legte man eine positive Masseneinheit auf den Nordpol des Magnets, von dem sie abgestoßen wird, so würde sie unter dem Einflusse dieser Abstoßung und der Anziehung des Südpoles eine Kraftlinie so lange durchwandern, bis sie in den Südpol einträte. Die dadurch gekennzeichnete Richtung des Weges kann man als die positive Richtung der Kraftlinien bezeichnen; denn eine negative magnetische Masse würde natürlich den umgekehrten Weg zurücklegen. Man nennt sie wohl auch die Richtung der Kraftlinien schlechthin und sagt, daß diese Linien

Digitized by Google

aus dem Nordpol eines Magnets aus- und in den Südpol wieder eintreten. Von dem Wege innerhalb der Magnete selbst soll erst später die Rede sein.

Fig. 2 ist noch einer weiteren Deutung fähig auf Grund der Beobachtung, daß die Kraftlinien derselben in der Nähe der Pole am dichtesten neben einander liegen, in weiterer Entfernung aber weniger dicht verlaufen. Bei der Herstellung des Bildes durch das Niederstreuen von Eisenfeilspänen erklärt sich dies einfach dadurch, daß die Pole die fallenden Spänchen am stärksten anziehen und daher in ihrer Nähe am dichtesten ablagern. In Fig. 2 gibt also die Dichte der Kraftlinien einen Überblick über die relative Größe der Feldstärke in jeder Entfernung von den Polen.

Der Wert dieser außerordentlich einfachen Darstellungsweise ließe sich noch wesentlich erhöhen, wenn man durch die Kraftliniendichte nicht nur die relative Größe der magnetischen Kräfte, sondern auch die absolute angeben könnte. Solange man Eisenfeilspäne für die Herstellung der Figuren benutzt, ist dies natürlich nicht möglich, da hier die Dichte der Kraftlinien einfach von der Zahl der Spänchen abhängt, die man ausstreut. Bei der graphischen Darstellung eines bekannten Feldes kann man dagegen die zu zeichnenden Kraftlinien willkürlich so dicht an einander legen, daß diese Dichte, nach bestimmten Regeln gewählt, die Größe der Feldintensität direkt angibt. Nach der heutigen allgemeinen Konvention hat man in einem räumlichen Felde überall pro qcm einer senkrecht zur Richtung der Kraftlinien gedachten Fläche so viele Kraftlinien zu zeichnen, wie Dynen magnetischer Kraft auf eine magnetische Masseneinheit wirken würden. Auf diese Weise dargestellt, gibt also die Kraftliniendichte pro qcm direkt die Feldstärke an.

Der obige Gedankengang bringt in Gestalt der Kraftliniendichte einen für den mechanisch geschulten Verstand ungewohnten Begriff in die weiteren Betrachtungen hinein, während die magnetische Kraft oder Feldstärke auf dem gewohnten Boden der exakten Mechanik bleibt. Im folgenden soll der neue Begriff deshalb nur dann gebraucht werden, wenn er aus anderen Gründen eine einfachere Auffassung der Dinge möglich macht. Für solche Fälle möge sich der Leser die einfache Brücke vor Augen halten, welche die beiden Begriffe mit einander verbindet: daß eine bestimmte Zahl z. B. von 𝔅 Kraftlinien pro qcm nichts anderes bedeutet als 𝔅 Dynen pro magnetische Masseneinheit. Auch folgender Vergleich kann vielleicht

Digitized by Google

dazu dienen, die beiden Begriffe mechanischen Vorstellungsformen näher zu bringen: Denkt man sich nämlich die Masseneinheit etwa wie Farbe mit einem Pinsel auf das qcm aufgetragen, so würde diese Fläche ebenfalls eine Kraft von $\mathfrak{B}$ Dynen erfahren. Die Kraftliniendichte oder die Feldstärke kann darnach in Analogie mit dem bekannten mechanischen Begriff als ein „magnetischer Flächendruck" betrachtet werden, welcher auf ein mit der magnetischen Masse 1 bedecktes qcm wirkt.

Das Bild des Kraftlinienverlaufes in Fig. 2 ändert sich sofort, wenn in die Nähe des Magnets ein zunächst unmagnetisches Stück Eisen gebracht wird (Fig. 3). Dieses Eisenstück wird bekanntlich

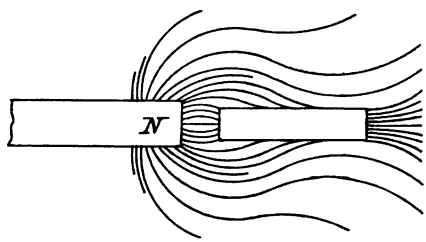


Fig. 3.

von dem Magnet angezogen. Eine Anziehung ist aber nur möglich, wenn es selbst vorher magnetisch geworden ist, denn ein Magnet kann auf einen unmagnetischen Körper nicht wirken. Liegt das Eisenstück in der Nähe des Nordpols des Magnets, so wird in demjenigen Ende, welches diesem Pole zugewandt ist, ein Südpol und in dem abgewandten ein Nordpol entstehen; denn der Südpol muß dem Magnet näher liegen, damit die auf ihn wirkende Anziehung die Abstoßung des Nordpols überwiegt. Wird jetzt eine positive magnetische Masseneinheit zwischen Magnet und Eisenstück gelegt, so wirkt darauf von links her (Fig. 3) abstoßend die Kraft eines Nordpoles und von rechts her anziehend die Kraft eines Südpoles, also muß die Gesamtkraft größer sein, als wenn nur der Magnet, nicht aber das Eisenstück vorhanden wäre. Die Kraft wird ferner um so größer werden, je näher der Einheitspol dem Magnet oder dem Eisenstück kommt. Kurz die vom Magnet ausgehenden Kraftlinien werden sich auf dem Wege zum Eisenstück weniger weit ausbreiten als vorher, in der Nähe desselben aber sich besonders stark zusammenziehen und mit großer Dichte dort eintreten. Es entspricht

Digitized by Google

dem Bilde des Kraftlinienverlaufes in Fig. 3, wenn gesagt wird, daß weiches Eisen die Kraftlinien eines Magnetfeldes in sich einsaugt.

Für die Elektromotoren- und Dynamomaschinen-Technik sind indes nicht stabförmige, sondern Hufeisen-Magnete mit cylindrisch-ausgebohrten Polen von Wichtigkeit. Den Verlauf der Kraftlinien, welche ein so gestalteter Magnet aussendet, zeigt Fig. 4. Die Linien gehen hier größtenteils direkt und geradlinig von Pol zu Pol über, in der Nähe der Kanten aber auf Umwegen. Einige wenige treten sogar garnicht aus den Polen, sondern aus den Schenkeln aus; doch sind diese in der Figur nicht dargestellt, da ihre Zahl bei guten Magnetgestellen nur sehr gering ist. Jede der zwischen den Polen

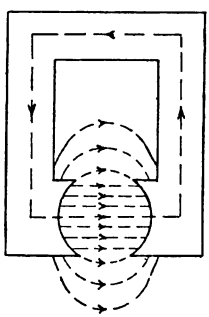


Fig. 4.

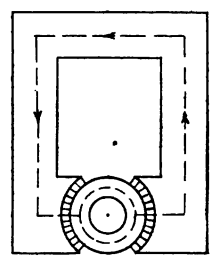


Fig. 5.

gezeichneten Kraftlinien setzt sich im Innern des Magnets zu einer geschlossenen Kurve fort, wie in Fig. 4 durch je eine Linie angedeutet ist. Der Kraftlinienverlauf im Eisen selbst soll indessen erst weiter unten (S. 20) besprochen werden. Vorläufig soll nur von demjenigen Abschnitt der Kraftlinien die Rede sein, welcher die Luftstrecke von Pol zu Pol überbrückt.

Die Ausbreitung der Kraftlinien außerhalb des cylindrischen Raumes zwischen den Polschuhen kann man vermeiden, wenn man einen eisernen „Anker“, bestehend aus einem cylindrischen Ring zwischen den Polen anbringt (Fig. 5). Der einsaugenden Wirkung dieses Eisenstückes gehorchend, treten die Kraftlinien jetzt von dem Nordpol aus mit wenigen Ausnahmen radial in den Anker ein, durchlaufen ihn und gehen dann symmetrisch aus dem Anker zum Südpol über. Auch jetzt noch benutzen freilich einige Linien den Weg

Digitized by Google

durch den Anker nicht, sondern gehen außerhalb desselben von Pol zu Pol oder aber von einem Magnetschenkel zum andern in ähnlicher Weise wie in Fig. 4. Diese Linien sind in Fig. 5 nicht mehr dargestellt; sie werden als Streulinien bezeichnet, und die ihnen zu Grunde liegende Erscheinung heißt: magnetische Streuung. Es möge schon hier hervorgehoben werden, daß es im Interesse des leichten Baues und ökonomischen Betriebes von Elektromotoren und Dynamos wichtig ist, möglichst alle Kraftlinien in den Anker hineinzuziehen und den Zwischenraum zwischen Polen und Anker möglichst dicht mit Kraftlinien zu füllen.

Um zu kontrollieren, in welchem Maße dies bei fertigen Maschinen erreicht ist, sind einfache Methoden auszubilden, welche es ermöglichen, die Verteilung der magnetischen Kraft $\mathfrak{B}$ in jenem Zwischenraum ohne viel Zeitaufwand experimentell festzustellen.

Wissenschaftlich völlig exakte Verfahren für diesen Zweck sind bekannt; sie sind indes in der Ausführung sehr umständlich und ohne tieferes Eingehen in die Elektricitätslehre theoretisch nicht abzuleiten. Da aber die oben gegebene abstrakte Definition von $\mathfrak{B}$ erst Leben gewinnt, wenn auch eine Methode zur Bestimmung dieser Größe gegeben wird, so möge hier ein Meßverfahren geschildert werden, das zwar nicht zu den genauesten gehört, aber die Feststellung von $\mathfrak{B}$ in dem Luftzwischenraum zwischen Magnetpolen und Anker in einfachster Weise möglich macht.

Es ist eine experimentell erwiesene Tatsache, daß das Metall Wismut die Eigenschaft hat, seinen elektrischen Widerstand im magnetischen Felde zu verändern, und zwar um so mehr zu steigern, je stärker dieses Feld ist. Die Größe der Zunahme ist durch genaue Messung mit Hilfe anderer Meßmethoden festgestellt worden. Bedeutet w den Widerstand eines Wismutdrahtes im magnetischen Felde von der Stärke $\mathfrak{B}$ und w_0 den Widerstand außerhalb desselben, so stellt Fig. 6 die relative Vergrößerung $\frac{w - w_0}{w_0}$ als Funktion von $\mathfrak{B}$ für eine Wismutsorte dar, ermöglicht also, $\mathfrak{B}$ aus einfachen Widerstandsmessungen von w und w_0 zu bestimmen. Der Wismutdraht wird gewöhnlich in Form einer flachen Spirale mit etwa $1^1/_2$ qcm Oberfläche angewandt und mit seinen beiden Enden an zwei langen Stielen aus anderem Metall befestigt, welche die Stromzuführung besorgen. Bei dieser Konstruktion kann der Draht leicht an jede Stelle des Magnetfeldes geführt werden.

Digitized by Google

Bei Elektromotoren und Dynamo-Maschinen wird die Magnetisierung des Eisengestelles bekanntlich stets durch Spulen hergestellt, welche über die Schenkel geschoben und beim Betriebe der Maschine mit Strom gespeist werden. Dieses Verfahren hat insbesondere bei Motoren gegenüber der Anwendung permanenter Magnete den Vorzug, daß die Magnetisierung mit größerer Sicherheit aufrecht erhalten und die Tourenzahl durch eine geringe Veränderung von $\mathfrak{B}$ leicht reguliert werden kann. Bei Dynamos kann man mit dem gleichen Mittel die Spannung in einfachster Weise regeln. Eine Kenntnis der Grundgesetze der Magnetisierung des Eisens durch elektrische Ströme ist daher für die Berechnung und für das Verständnis der Betriebseigenschaften von Elektromotoren von größter Wichtigkeit. Im folgenden sollen diese Gesetze kurz dargestellt werden.

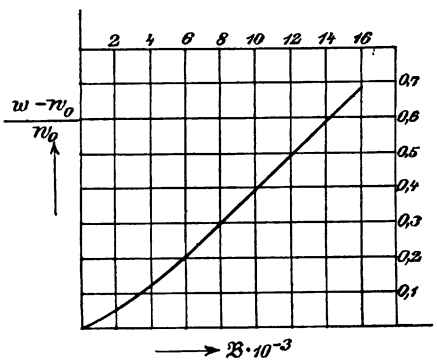


Fig. 6.

Die Betrachtungen mögen ausgehen von einem geraden Stab (Fig. 2), welcher über seine ganze Länge mit einer Spule umwickelt sei. Besteht dieser Stab aus Eisen, so kann er magnetisiert werden, indem Strom durch die Wickelung geschickt wird. Der auf diese Art erzeugte Elektromagnet wirkt dann genau in derselben Weise ablenkend auf eine benachbarte Magnetnadel wie der permanente Magnet, dessen Fernwirkungen am Eingang dieses Abschnittes besprochen wurden. Die Richtung der Magnetisierung hängt von der Richtung ab, in welcher der Strom den Stab umfließt. Es entsteht ein Südpol an demjenigen Ende, auf welches ein Beschauer des Stabes blicken muß, um den Strom im Sinne des Uhrzeigers fließen zu sehen, am anderen aber entsteht ein Nordpol. Da andererseits die Kraftlinien

Digitized by Google

immer aus dem Nordpol austreten, so kann die Regel auch in der Form gegeben werden, daß der Beschauer in die Richtung der erzeugten Kraftlinien blickt, wenn er so vor dem Stabe steht, daß er den Strom im Sinne des Uhrzeigers fließen sieht.

Wenn die stromdurchflossene Spule im stande ist, den Eisenkern zu magnetisieren, so ist anzunehmen, dafs ihr selbst eine magnetische Kraft innewohnt. Diese Schlußfolgerung bestätigt sich durch die Erfahrung, wenn man den Eisenkern aus der Spule entfernt. In diesem Falle bringt auch die Spule allein eine Ablenkung der Magnetnadel hervor; ihre Wirkung ist aber schwächer, als wenn sie den Eisenstab noch enthielte.

Bei der gleichen Natur der beiden Phänomene wird man offenbar das Magnetfeld einer Spule in derselben Weise wie das Feld eines wirklichen Magnets darstellen können durch Kraftlinienbilder oder durch die Angabe der Anzahl Dynen, welche irgendwo auf einen Einheitspol wirken würden. An diese Tatsache aber läßt sich für den Kraftlinienverlauf innerhalb der Magnete eine sehr interessante und wichtige Schlußfolgerung knüpfen.

Bei den früheren Betrachtungen an der Hand der Figuren 2—5 ist nämlich stillschweigend die Voraussetzung gemacht worden, daß nur außerhalb der Magnete Kräfte wirken. Denkt man sich jetzt aber einen Eisenkern, wie z. B. den in Fig. 2 dargestellten, durch eine Spule ersetzt, so erkennt man, daß auch in seinem Innern Kräfte wirken müssen. Für die Spule ist dies selbstverständlich, denn wenn diese oder die Gesamtheit ihrer Windungen Kräfte nach außen ausübt, so muß jede einzelne Windung solche Kräfte erzeugen; die Kräfte einer jeden Windung werden aber in deren Nähe am größten sein, und so werden gerade im Innern der Spule die stärksten Kräfte auftreten und daher die Kraftlinien am dichtesten gezeichnet werden müssen. In analoger Weise ist nun auch bei dem Eisenstabe, wie die genaue Theorie lehrt, das in Fig. 2 gegebene Bild der äußeren Kraftlinien durch ein im Innern des Kernes parallel zur Achse liegendes dichtes Kraftlinienbüschel zu ergänzen, und es bleibt nur noch die Frage zu beantworten, wie beide Kraftliniensysteme in einander übergehen.

Betrachtet man zu diesem Zwecke zunächst wieder die Spule und denkt man sich eine magnetische Masseneinheit im Innern unter dem Einflusse der dort herrschenden Kraft bis an das Spulenende bewegt, so wird die Masse, dort angekommen, die Bewegung

Digitized by Google

nach außen einfach fortsetzen müssen. Eine Unstetigkeit der Kraft und der Bewegung am Ende der Spule würde der Natur der Sache widersprechen, denn der Einheitspol befindet sich sowohl innerhalb wie außerhalb der Spule im Wirkungsbereiche ihrer einzelnen Windungen. Wenn sich aber die Bahn der Bewegung außerhalb unmittelbar an die innerhalb liegende Bahn anschließt, so bedeutet dies, daß die innen und außen gelegenen Kraftlinien unmittelbar in einander übergehen. Das dichte Kraftlinienbündel, welches im Innern der Spule vorhanden ist, breitet sich beim Austritt aus der Spule büschelförmig (Fig. 2) aus, und alle Kraftlinien treten am anderen Ende der Spule wieder ein. Jede Kraftlinie ist also in sich geschlossen.

Der Kraftlinienverlauf, welcher soeben für die Spule allein entworfen wurde, bleibt auch bestehen, wenn Eisen in der Spule vorhanden ist. Die Verstärkung der Kraftwirkung auf eine in der Nachbarschaft befindliche Magnetnadel bedeutet nur, daß die Kraftlinien durch das Vorhandensein des Eisens jetzt außen und mit Rücksicht auf ihre Kontinuität auch innen dichter verlaufen.

In reinster Form kann man die Vorgänge der Magnetisierung natürlich studieren, wenn man die Eisenkörper so gestaltet, daß die Kraftlinien überhaupt nicht in Luft überzutreten brauchen. Diese Forderung wird z. B. erfüllt, wenn man einen in sich geschlossenen Eisenring mit Windungen gleichmäßig dicht umwickelt. In solchem Ringe verlaufen die Kraftlinien einfach in konzentrischen Kreisen, und der Vorgang der Magnetisierung ist folgender:

Die ringförmige Drahtspule besitzt eine magnetisierende Kraft, d. h. sie erzeugt ein magnetisches Feld von bestimmter Intensität, oder konzentrische Kraftlinien von bestimmter Dichte, auch wenn sie nicht um einen Eisenring, sondern z. B. um einen Holzring gewickelt oder ganz hohl ist. Ein Einheitspol, in den Hohlraum gebracht, würde also eine Kraftwirkung erfahren. Diese Kraft heißt die magnetisierende Kraft ($\mathfrak{H}$) der Spule, denn sie bildet die Ursache der Magnetisierung, welche man erhält, wenn man den Hohlraum mit Eisen anfüllt. Ist Eisen in der Spule, so nimmt man wahr, daß die magnetische Kraft im Innern größer ist, als sie ursprünglich in der hohlen Spule war. Die gewonnene Kraft heißt „magnetische Induktion“. $\mathfrak{H}$ sowohl wie $\mathfrak{B}$ werden, wie alle magnetischen Kräfte, in Dynen gemessen. Das Verhältnis $\mathfrak{B} : \mathfrak{H} = \mu$ gibt einen Maßstab für die Leichtigkeit, mit welcher sich verschiedene Eisensorten magnetisieren lassen, und wird „Permeabilität“ genannt.

Digitized by Google

Der Wert von $\mathfrak{B}$, welcher bei verschiedenen magnetisierenden Kräften im Eisen auftritt, hängt ab von der chemischen und mechanischen Beschaffenheit desselben. Die Kurve, welche $\mathfrak{B}$ als Funktion von $\mathfrak{H}$ darstellt, wird als die Magnetisierungskurve bezeichnet. Sie muß für jede Eisensorte durch das Experiment besonders bestimmt werden und hat sich mathematisch bisher noch nicht ausdrücken lassen. Bei gutem weichen Schmiedeisen ist ihr Verlauf etwa folgender:

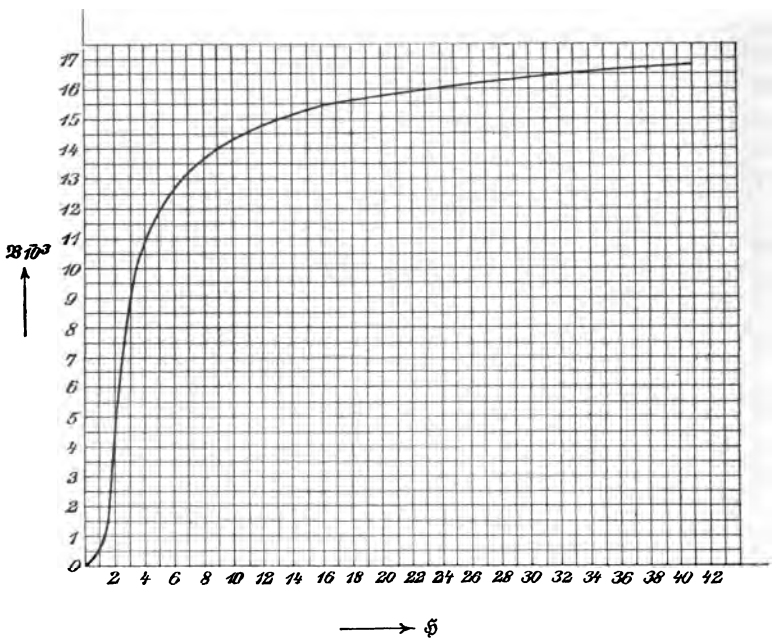


Fig. 7.

Wenn man (Fig. 7), vom unmagnetischen Zustande, wo $\mathfrak{H} = 0$ und $\mathfrak{B} = 0$ ist, beginnend, $\mathfrak{H}$ langsam steigert, so steigt zunächst auch $\mathfrak{B}$ langsam an. Bei einem gewissen Wert von $\mathfrak{H}$, der ungefähr 1 Dyne beträgt, wird die Zunahme von $\mathfrak{B}$ bei gleichmäßig steigendem $\mathfrak{H}$ plötzlich viel stärker. Während $\mathfrak{B}$ bis jetzt nur den Wert von etwa 600 Dynen erreicht hat, steigt es in dem Intervall von $\mathfrak{H} = 1$ bis $\mathfrak{H} = 5$ auf etwa 12 000 an. In diesem Teile verläuft die Magnetisierungskurve zunächst fast geradlinig und sehr steil und biegt sich dann knieförmig um. Bei $\mathfrak{H} = 7$ hat das Knie die stärkste

Digitized by Google

Krümmung. Diese hält an bis etwa $\mathfrak{H} = 16$, wo $\mathfrak{B}$ rd. = 15500 ist. Hinter $\mathfrak{H} = 16$ steigt $\mathfrak{B}$ nur noch sehr langsam an, ohne daß freilich ein Maximalwert erreicht wird. Bis zu $\mathfrak{H} = 1300$ ist die Zunahme von $\mathfrak{B}$ noch etwas größer als die von $\mathfrak{H}$. Von hier an aber verstärkt das Eisen das Feld nicht mehr, sondern $\mathfrak{B}$ nimmt nur noch in demselben Maße zu wie $\mathfrak{H}$. Man spricht deshalb von einer magnetischen Sättigung des Eisens in diesem Bereich.

Die Magnetisierungskurven für andere Eisen- und Stahlsorten verlaufen zwar im einzelnen verschieden und werden wesentlich durch kleine Änderungen der chemischen Zusammensetzung, der Härte etc. beeinflußt, haben aber alle denselben allgemeinen Charakter.

Technisch wichtig ist nun weniger der Zusammenhang zwischen $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$, welcher die Natur des Magnetisierungsvorganges wissenschaftlich am einfachsten darstellt, als die Beziehung zwischen $\mathfrak{B}$ und der Windungszahl und Stromstärke der Spule, von welcher $\mathfrak{B}$ erzeugt werden soll. Beim Elektromotoren- und Dynamomaschinenbau liegt die Aufgabe vor, im Luftzwischenraum zwischen den Magnetpolen und dem Anker eine bestimmte Kraftlinienzahl herzustellen und die Magnetisierungsspulen entsprechend zu berechnen. Um diese Aufgabe zu lösen, muß also der Kraftlinienverlauf der bei elektrischen Maschinen vorkommenden Magnetformen noch näher besprochen werden.

Die einfachste Magnetform bildet das Hufeisen, welches aus zwei parallelen Schenkeln mit je einem Pole und einem beide Schenkel verbindenden Joche besteht. Die Kraftlinien verlaufen hier geschlossen durch Joch, Schenkel, Pole und den zwischen den Polen liegenden Anker hindurch, wie in Fig. 4 und 5 schematisch durch je eine Linie angedeutet ist. Das ganze System besteht also aus einem Bündel in einander liegender geschlossener Kraftlinien, welche man als einen „magnetischen Kreis“ zu bezeichnen pflegt.

Der Kraftlinienverlauf in zweipoligen Magnetgestellen mit dem sogenannten „mehrfachen Schluß“ oder in mehrpoligen Magnetgestellen ergibt sich leicht, wenn man diese Magnetformen als Kombinationen mehrerer einfacher Hufeisenmagnete betrachtet. So läfst sich das in Fig. 8 gezeichnete Gestell auffassen als eine Vereinigung zweier auf einander liegender einfacher Magnete, und das vierpolige Gestell in Fig. 9 würde aus vier an einander gelegten Hufeisenmagneten mit radial liegenden Trennungsflächen bestehen. Der gesamte Verlauf der Kraftlinien ergibt sich bei dieser Auffassung

Digitized by Google

sogleich, wenn man bedenkt, daß jeder der einzelnen Hufeisenmagnete mit dem gegenüberliegenden Ankerstück und Luftraum einen magnetischen Kreis bildet. In Fig. 8 sind also zwei, und in Fig. 9 vier solcher Kreise vorhanden, wie durch gestrichelte Linien angedeutet ist. Wird die totale Kraftlinienzahl, welche aus einem Pole austritt, mit N und die Kraftlinienzahl eines magnetischen Kreises mit N' bezeichnet, so ist also in Fig. 4 und 5 $N = N'$ und in Fig. 8 und 9 $N = 2\,N'$. Die Aufgabe, Pole von bestimmter Stärke zu bilden, kann also auch so aufgefaßt werden, daß magnetische Kreise von bestimmter Kraftlinienzahl durch passende Bewickelung der Magnetschenkel erzeugt werden sollen.

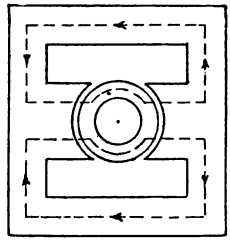


Fig. 8.

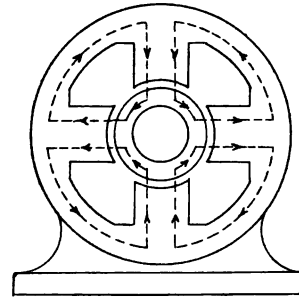


Fig. 9.

Um die weiteren wissenschaftlichen Grundlagen für die Lösung dieser Aufgabe darzulegen, mögen die mittleren Längen der Kraftlinien in den einzelnen Stücken der magnetischen Kreise mit l und die Querschnitte mit s bezeichnet werden; zur Unterscheidung der Stücke unter einander werde ferner der Index A für den Anker, L für den Luftzwischenraum, S für die Schenkel und J für das Joch angefügt. Da der magnetische Kraftfluß kontinuierlich, also die gesamte Kraftlinienzahl N' überall gleich ist, so erhält man zunächst die Kraftliniendichten pro qcm in den einzelnen Stücken durch die Formeln:

$$\mathfrak{B}_A = \frac{N'}{s_A}, \quad \mathfrak{B}_L = \frac{N'}{s_L}, \quad \mathfrak{B}_S = \frac{N'}{s_S}, \quad \mathfrak{B}_J = \frac{N'}{s_J}.$$

Wegen der Verschiedenheit der Querschnitte sind die Werte von $\mathfrak{B}$ naturgemäß von einander verschieden. Sind die Magnetisierungskurven der einzelnen Materialien bekannt, so erhält man unter Benutzung derselben aus den magnetischen Induktionen $\mathfrak{B}$ die

Digitized by Google

magnetisierenden Kräfte $\mathfrak{H}_A$, $\mathfrak{H}_L$, $\mathfrak{H}_S$, $\mathfrak{H}_J$, welche für die einzelnen Stücke aufzuwenden sind.

Unter Benutzung dieser Werte als Ausgang berechnet man die auf die Magnetschenkel zu schiebenden Spulen, welche den Kraftstrom N' herstellen sollen, mit Hilfe eines einfachen Gesetzes, dessen Beweis an dieser Stelle zu weit führen würde. Die Größe der gesamten Arbeit P, welche von der magnetischen Kraft der Spule auf eine magnetische Masseneinheit übertragen wird, wenn diese über die ganze Länge einer in sich geschlossenen Kraftlinie einmal rings herum bewegt wird, ist nämlich unabhängig von der Form der Spule und der Gestalt und Länge der Kraftlinien und nur bestimmt durch die Zahl der Windungen n, aus denen die Spule besteht, und der Stromstärke J, von der sie durchflossen wird. Unter der alleinigen Voraussetzung, daß jede Kraftlinie alle Windungsebenen der Spule schneidet, oder mit dieser „n-fach verkettet" ist, hat P den Wert

$$P = 0{,}4\,\pi\,n\,J.$$

Wegen der Analogie der obigen Definition von P mit der früher gegebenen des Begriffes der elektromotorischen Kraft, welche die Arbeit einer elektrischen Masseneinheit beim Durchfließen eines elektrischen Stromkreises bedeutete, wird P auch als die „magnetomotorische Kraft" der Spulen bezeichnet.

Dieser Satz wird in folgender Weise für die vorliegende Aufgabe verwertet: Die Arbeit P kann man auch ausdrücken aus den magnetisierenden Kräften $\mathfrak{H}$, welche die Spule in den einzelnen Stücken l des magnetischen Kreises herstellen muß, damit der gesamte Kraftstrom N' entsteht. Da $\mathfrak{H}$ nichts anderes als die magnetische Kraft der Spule auf einen Einheitspol bedeutete, so wird $\mathfrak{H}\,l$ der Anteil eines Stückes l an der gesamten Arbeit P der Spule, und diese Gesamtarbeit wird

$$P = \mathfrak{H}_A\,l_A + \mathfrak{H}_L\,l_L + \mathfrak{H}_S\,l_S + \mathfrak{H}_J\,l_J = 0{,}4\,\pi\,n\,J. \quad . \quad (10)$$

Da die Berechnung von $\mathfrak{H}_A$, $\mathfrak{H}_L$, $\mathfrak{H}_S$ und $\mathfrak{H}_J$ bereits oben angegeben ist, so gestattet diese Gleichung, $n\,J$ zu bestimmen. Wird $\mathfrak{H}$, wie üblich, in Dynen und l in cm ausgedrückt, so ergibt sich J in Ampère.

Genauer genommen gilt diese Berechnung aber nur für ein unendlich dünnes Kraftlinienbündel, da nur für ein solches die Längen l eindeutige Begriffe sind. Bei endlichen Dimensionen müßte der

Digitized by Google

ganze magnetische Kraftstrom N' in einzelne sehr dünne Fäden zerlegt, für jeden einzelnen Faden müßte P berechnet und aus den einzelnen Werten das Mittel genommen werden. Statt dessen genügt es aber, nach Fig. 4, 5, 8 und 9 eine mittlere Kraftlinie zu zeichnen und für diese allein P zu bestimmen.

Gl. 10 gibt also als Endresultat ein Produkt aus der Windungszahl n und der in Ampère gemessenen Stromstärke J der Spule. nJ wird als die Anzahl der Ampèrewindungen bezeichnet. Die Tatsache, daß nJ und nicht n oder J allein für die Magnetisierung maßgebend sind, zeigt, daß man beliebige Magnetisierungen mit Spulen von wenigen Windungen und starken Strömen oder von vielen Windungen und geringen Strömen herstellen kann. Um mit möglichst wenig Ampèrewindungen ein verlangtes N zu erzeugen, muß man die Querschnitte s möglichst groß und die Längen l möglichst klein machen, also möglichst gedrängte Magnetformen benutzen. Diese Erkenntnis hat im Dynamomaschinenbau historische Bedeutung, denn die älteren Maschinen, insbesondere die Edisonschen ersten Glühlichtmaschinen, hatten sehr lange und sehr dünne Schenkel.

Um die Berechnung von nJ möglichst zu vereinfachen, pflegt man Gl. 10 in der Form zu schreiben:

$$\frac{\mathfrak{H}_A}{0{,}4\pi} l_A + \frac{\mathfrak{H}_L}{0{,}4\pi} l_L + \frac{\mathfrak{H}_S}{0{,}4\pi} l_S + \frac{\mathfrak{H}_J}{0{,}4\pi} l_J = nJ. \quad . \quad . \quad (11)$$

und als die Magnetisierungskurve einer Eisensorte nicht $\mathfrak{B}$ als Funktion von $\mathfrak{H}$, sondern von $\frac{\mathfrak{H}}{0{,}4\pi}$ aufzutragen. Nach Gl. 11 kann man $\frac{\mathfrak{H}}{0{,}4\pi}$ als die Ampèrewindungszahl pro cm der mittleren Kraftlinienlänge bezeichnen. Im folgenden soll dafür der Buchstabe Z benutzt werden.

In Fig. 10 sind diese Kurven für Gußeisen, Flußeisen, Schmiedeisenstücke mit größeren Querschnitten und für schmiedeisernes Ankerblech dargestellt[1]). Je zwei Kurven tragen dabei dieselbe Bezeichnung und bilden Teile einer einzigen Kurve derart, daß für die untere der unten angegebene und für die obere der oben angegebene Abszissenmaßstab gilt. Man erkennt, daß die Magnetisierbarkeit von Gußeisen weit geringer ist als die aller übrigen Eisensorten, während Flußeisen leichter magnetisiert werden kann als selbst

[1]) Entnommen aus Kapp, Dynamomaschinen 3. Aufl., S. 172.

Digitized by Google

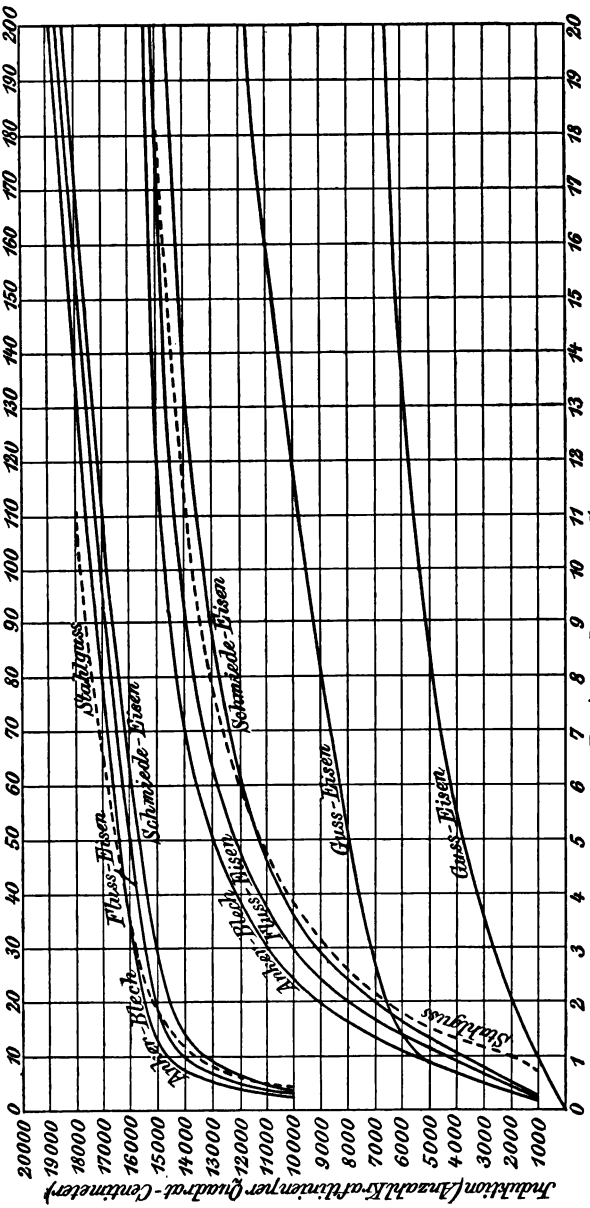


Fig. 10.

Digitized by Google

Schmiedeisen. Um eine bestimmte Kraftlinienzahl bei gleicher magnetomotorischer Kraft zum Anker zu führen, bedarf es bei Gußeisen daher weit größerer Querschnitte. Die neuerdings sehr vielfach verwendeten Stahlguß-Magnetgestelle leisten bei etwa halbem Gewicht magnetisch dasselbe wie die gußeisernen und sind in Betrieben, wo es auf geringeren Raumbedarf und auf Leichtigkeit ankommt, wie z. B. bei elektrischen Bahnen, allein am Platze. In anderen Fällen kann der Preis entscheidend sein.

Man kann das in Gl. 10 zum Ausdruck kommende Gesetz in eine interessante äußere Analogie bringen mit dem Ohmschen Gesetz, wenn man den Begriff der magnetischen Permeabilität μ einer Eisensorte nach der schon früher gegebenen Definitionsgleichung $\mu = \mathfrak{B} : \mathfrak{H}$ benutzt. Gl. 10 kann man nämlich, wenn $\frac{\mathfrak{B}}{\mu}$ statt $\mathfrak{H}$ und $\frac{N'}{s}$ statt $\mathfrak{B}$ gesetzt wird, auf die Form bringen:

$$N' \left(\frac{1}{\mu_A} \frac{l_A}{s_A} + \frac{1}{\mu_L} \frac{l_L}{s_L} + \frac{1}{\mu_S} \frac{l_S}{s_S} + \frac{1}{\mu_J} \frac{l_J}{s_J} \right) = 0{,}4\,\pi\, n\, J. \quad (12)$$

Die Ausdrücke $\frac{1}{\mu} \frac{l}{s}$ in der Klammer sind genau von der Form des Definitionsausdruckes für den elektrischen Widerstand (Gl. 2 S. 2); denn im Zähler findet sich die Länge, im Nenner der Querschnitt des betrachteten Körpers, und μ als Permeabilität oder magnetische Durchlässigkeit des Eisens steht in begrifflicher Analogie mit der Leitungsfähigkeit λ gegenüber dem elektrischen Strom. Man pflegt deshalb auch $\frac{1}{\mu} \frac{l}{s}$ als den magnetischen Widerstand zu bezeichnen.

Gl. 12 besagt danach, daß die magnetomotorische Kraft eines magnetischen Kreises gleich ist dem Produkte aus dem gesamten magnetischen Widerstande desselben und dem gesamten magnetischen Kraftfluß N'. Die äußere Analogie dieses Satzes mit dem Ohmschen Gesetze für elektrische Ströme ist offenbar. Innerlich besteht aber darin eine große Verschiedenheit, daß die specifische elektrische Leitungsfähigkeit λ konstant ist, während sich die magnetische Permeabilität $\mu = \mathfrak{B} : \mathfrak{H}$ mit der Größe von $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$, entsprechend Fig. 7, verändert. Während der wesentliche Inhalt des Ohmschen Gesetzes in der Feststellung besteht, daß E.M.K. und Stromstärke in ein und demselben Stromkreise im konstanten Ver-

Digitized by Google

hältnis $w = E:J$ stehen, ist das entsprechende Verhältnis beim magnetischen Kreise mit dem Sättigungsgrade veränderlich. Eine völlige Übereinstimmung in den Gesetzen der elektrischen und magnetischen Vorgänge ist schon deswegen nicht zu erwarten, weil diese ihrer Natur nach ganz verschieden sind. Während die elektrische Strömung ein dynamischer Vorgang ist, ist die Magnetisierung ein statischer Zustand. Während die Unterhaltung des elektrischen Stromes Arbeit kostet, verbraucht diejenige der einmal hergestellten Magnetisierung keine Arbeit. Bei Elektromagneten ist die Magnetisierung natürlich an den Strom in den Spulen gebunden, und für die Unterhaltung des letzteren, nicht aber der Magnetisierung selbst ist die Arbeit aufzuwenden, welche früher (S. 10) durch Gl. 6 bestimmt wurde.

An diese Erklärungen schließen sich zweckmäßig einige Bemerkungen über das Entstehen und Vergehen der Magnetisierung an, weil die Begleiterscheinungen dieser Vorgänge für die Technik von Wichtigkeit sind. Da die Magnetisierung als eine Anhäufung potentieller Energie aufzufassen ist, aus deren Vorrat in jedem Augenblick auf magnetische Massen Bewegung, also Arbeit übertragen werden kann, so kann der Magnetismus immer nur unter Arbeitsaufwand hergestellt werden. Die aufgewandte Arbeit wird natürlich beim Aufhören der Magnetisierung wieder gewonnen, bei Elektromagneten in Gestalt eines Stromstoßes, welcher die Windungen noch durchfließt, wenn der Stromkreis schon unterbrochen ist, und den so unwillkommenen Öffnungsfunken hervorbringt. Die Intensität dieses Öffnungsstromes wird um so stärker, je größer die Kraftlinienzahl des aufhörenden Feldes und, wie die spezielle Theorie noch lehrt, je größer auch die Zahl der Windungen der Elektromagnet-Spule ist. In der Berücksichtigung dieses Naturgesetzes sind die Mittel zu suchen, schädliche Funkenbildung zu vermeiden. Bei der Besprechung des Funkens der Kollektoren von Gleichstrom-Ankern wird später davon Gebrauch gemacht werden.

Das oben abgeleitete Grundgesetz des „magnetischen Kreises“ gibt zwar gegenüber Gl. 10 weder neue wissenschaftliche Erkenntnis noch größere Einfachheit oder Sicherheit in der Rechnung. Es hat indessen für die Elektrotechnik dadurch Bedeutung gewonnen, daß es die Anschauung in vielen Fällen zu Hilfe bringt, wo die exakte Rechnung versagt. Der magnetische Kreis ist in der Vorstellung des modernen Elektrotechnikers zu einem Kraftlinienstrom

Digitized by Google

geworden, welcher, durch eine magneto-motorische Kraft in Bewegung gesetzt, magnetische Widerstände zu überwinden hat. Nach dieser Vorstellung werden die Kraftlinien denjenigen Weg wählen, wo sie den geringsten Widerstand finden, d. h. wo immer möglich eine Bahn von Eisen suchen. In letzterem selbst werden sie dort am dichtesten verlaufen, wo sie den kürzesten geschlossenen Weg einschlagen können. Diese Auffassung ist in ihren allgemeinen Schlußfolgerungen überaus fruchtbar, bei ihrer Ausnutzung für spezielle Fälle bleibt indessen noch viel dem persönlichen Ermessen des Rechnenden überlassen.

Eine praktisch wichtige Erscheinung, bei welcher das Gesetz des magnetischen Kreises wenigstens die Art des Einflusses der verschiedenen maßgebenden Faktoren übersehen lehrt, ist z. B. die magnetische Streuung der Pole. Die Anzahl der Streulinien, d. h. die Anzahl derjenigen Kraftlinien, welche von einem Magnetpol zum anderen übergehen, ohne den Anker zu durchströmen, ist heute einer wissenschaftlich exakten Berechnung noch durchaus unzugänglich. Da die Größe dieses Betrages aber für jede Maschine von Bedeutung ist, so möge hier ein Berechnungsverfahren von Kapp kurz geschildert werden, welches gleichzeitig dazu dienen mag, in den Geist der modernen Auffassung und Benutzung des magnetischen Kreislaufgesetzes näher einzuführen.

Kapp geht aus von der Tatsache, daß für die Streulinien zwischen den Polflächen dieselbe magnetomotorische Kraft zur Verfügung steht, wie für die anderen Kraftlinien, welche von dort aus den Anker und den Luftzwischenraum zwischen Anker und Polen durchströmen. Diese M.M.K. hat den Wert:

$$\mathfrak{H}_A l_A + \mathfrak{H}_L l_L.$$

Wird der Widerstand, den die Streulinien in der Luft auf ihrem Wege finden, mit ϱ bezeichnet, so ist nach dem Grundgesetz des magnetischen Kreises der gesamte Streulinienfluß

$$S = \frac{\mathfrak{H}_A l_A + \mathfrak{H}_L l_L}{\varrho} \quad \ldots\ldots \quad (13)$$

S wäre also leicht zu berechnen, wenn ϱ bekannt wäre. Aber ϱ läßt sich mit Genauigkeit nicht ermitteln, da der Weg der Streulinien nicht festgestellt werden kann. Dem Begriffe des magnetischen Widerstandes entsprechend, muß ϱ der mittleren Länge des Streulinienbündels direkt und dem Querschnitt umgekehrt proportional sein. Nimmt man an, ϱ sei für einen bestimmten Maschinentypus bekannt und gleich k, so würde ϱ bei f-facher linearer Vergrößerung sich proportional $f : f^2$, d. h. umgekehrt proportional f verändern. Kapp gibt nun k für verschiedene Maschinentypen nicht in der Weise an, daß man durch f, sondern daß man durch

Digitized by Google

eine der Hauptdimensionen der zu berechnenden Maschinen selbst zu dividieren hat. Als solche wählt er, um kleine Änderungen der Dimensionsverhältnisse zulassen zu können, die Quadratwurzel aus dem Produkt von Länge l und Durchmesser d des Ankers, beide in cm, sodaß er

$$\varrho = \frac{k}{\sqrt{l\,d}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (13a)$$

setzt.

Für k gibt er folgende Werte an:

für Hufeisenmagnete mit oben liegenden Polen $k = 0{,}29$
für Hufeisenmagnete mit unten liegenden Polen[1]) (Fig. 5) $k = 0{,}21$
für Magnete mit doppeltem Schluß (Fig. 8) $k = 0{,}12$
für mehrpolige Magnetgestelle mit Außenkranz (Fig. 9) je nach Breite und Abstand der Pole $k = 0{,}35$ bis $0{,}55$

Der Einfachheit halber ist k so gewählt, daß in Gl. 13 als Zähler nicht die magnetomotorischen Kräfte $\mathfrak{H}\,l$, sondern die Ampèrewindungen Zl einzuführen sind, welche für die Magnetisierung von Anker und Luftraum aufzuwenden sind. Da sich beide Größen nur durch den Faktor $0{,}4\,\pi$ unterscheiden, so ändert dies am Prinzip der Methode nichts.

Bei Beurteilung des praktischen Wertes dieses Verfahrens, welches der mangelhaften Grundlagen wegen an sich keine genauen Resultate ergeben kann, muß berücksichtigt werden, daß die Streulinien bei den heutigen Typen keinen sehr großen Betrag ausmachen. Bei einem einfachen Hufeisenmagnet mit oben liegenden Magnetpolen beträgt die zerstreute Kraftlinienzahl ungefähr 25% von derjenigen, welche in den Anker wirklich hineingeht. Bei mehrpoligen Maschinen nach Art von Fig. 9 ist dieses Verhältnis noch geringer. Der Fehler, welcher bei der Berechnung des absoluten Wertes der Streulinienzahl gemacht wird, geht also im allgemeinen mit weniger als dem vierten Teil in die Berechnung der Ampèrewindungen der Magnetspulen ein.

Zur Illustration der in diesem Abschnitte dargestellten Gesetze möge nun noch als Beispiel die Berechnung der Magnetspulen eines modernen Motors folgen. Gewählt werde dazu der bekannte Hufeisentypus mit Dimensionen nach Fig. 11—12. Material des Ankers: weiches Schmiedeisen, des Magnetgestells: Flußeisen. Verlangt werde als gesamte Kraftlinienzahl für den Anker $N = 2{,}1 \cdot 10^6$.

Der schematische Verlauf der Kraftlinien im Magnetgestell ist

[1]) Maschinen mit unten liegenden Polen werden nicht direkt auf die Grundplatte, sondern auf eine daraufliegende Zinkplatte gestellt. Trotzdem werden durch das Eisen der Grundplatte von dem Anker mehr Kraftlinien abgezogen, als wenn nur Luft vorhanden wäre.

Digitized by Google

hier analog der gestrichelten Linie in Fig. 5. Der Kraftlinienstrom geht gleichmäßig durch Schenkel und Joch, und die mittlere Länge kann durch die Mittellinie (Fig. 12a) dargestellt werden. Genau genommen werden zwar die inneren Kraftlinien, da sie kürzer sind, etwas dichter verlaufen als die äußeren, und die mittlere Länge wird

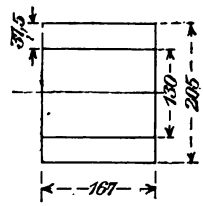


Fig. 11a.

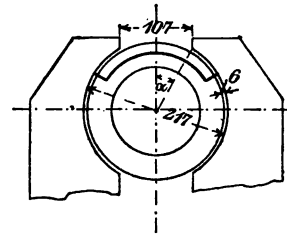


Fig. 11b.

Fig. 12a.

Fig. 12b.

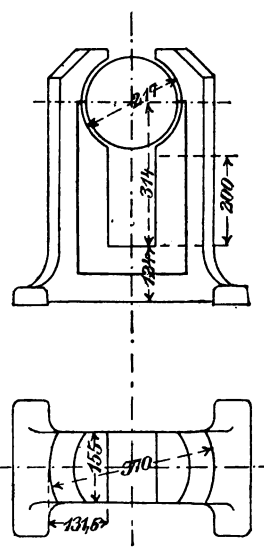


Fig. 12c.

daher etwas geringer sein als gezeichnet ist. Die ganze magnetomotorische Kraft für das Magnetgestell wird sich aber als so klein ergeben, daß sie keine praktische Bedeutung hat. Auch die Unsicherheit bei der Aufzeichnung der Mittellinie in der Nähe der außen abgeschrägten Pole ist daher belanglos.

Digitized by Google

Im Anker verteilen sich die Kraftlinien in die obere und untere Hälfte. Da sie nur von den Polflächen aus in den Anker übergehen, so tritt die mittlere Linie aus der Mitte einer Polhälfte aus und verläuft dann z. B. in der oberen Hälfte wie in Fig. 11b. Diese Mittellinie und die entsprechende in der unteren Ankerhälfte könnte man sich auch durch das Magnetgestell fortgesetzt denken. Die beiden Linien des letzteren müßten dann aber wieder die Mittellinie in Fig. 12a ergeben.

Danach gestaltet sich die Rechnung, wie folgt: Anker: Cylinderring. Jeder Ringquerschnitt $= 3{,}75 \cdot 16{,}7$ qcm. Aus später anzugebenden Gründen wird der Ankerkörper aus dünnen Eisenblechen zusammengesetzt, welche durch eine Oxydschicht, durch Anstrich oder durch dünne Papierblättchen von einander isoliert werden. Rechnet man für die Isolation 5 % des Ankervolumens, so wird der gesamte Ankerquerschnitt (Summe beider Ringquerschnitte) $s_A = 2 \cdot 3{,}75 \cdot 16{,}7 \cdot 0{,}95 = 119{,}0$ qcm, also $\mathfrak{B}_A = 2{,}1 \cdot 10^6 : 119 = 17600$. Aus Fig. 10 ergibt sich dafür $Z_A = 108$. Die Länge des Kraftlinienweges im Anker ergibt sich aus Fig. 11b, worin $\sin \alpha = \frac{107}{2} : \frac{217}{2}$, also $\alpha = 29{,}54^0$, *rd.* 30^0 ist und die Größe des Polbogens 120^0 betragen soll. Hiernach ist der Winkel des peripherischen Teiles des Kraftlinienweges im Anker $= 2\,\alpha + 2 \cdot \frac{120^0}{4} = 120^0$ und die Länge dieses Weges: $\frac{205 + 130}{2}\,\pi\,\frac{120^0}{360^0} = 17{,}4$ cm. Gesamter Kraftlinienweg im Anker $l_A = 3{,}75 + 17{,}4 = 21{,}2$ cm. Notwendige Ampèrewindungszahl $Z_A \cdot l_A = 2289$.

Luftzwischenraum. Für die Querschnittsberechnung ist die Mitte zwischen innerer Polfläche und äußerer Ankerfläche in Betracht zu ziehen. Bogenlänge: $21{,}1 \cdot \pi\,\frac{120^0}{360^0} = 22{,}1$ cm. Um zu berücksichtigen, daß die Kraftlinien von den Polkanten nicht radial zum Anker übergehen, sondern sich dabei nach außen ausbreiten („Polbart"), pflegt man die mittlere Bogenlänge um den Abstand zwischen Anker und Pol zu vergrößern. Korrigierte Bogenlänge: $22{,}1 + 0{,}6 = 22{,}7$ cm. Luftquerschnitt $s_L = 22{,}7 \cdot 16{,}7 = 379{,}1$ qcm. $\mathfrak{B}_L = \frac{2{,}1 \cdot 10^6}{379{,}1} = 5540 = \mathfrak{H}_L$. Ferner $Z_L = \frac{\mathfrak{H}_L}{0{,}4 \cdot \pi} = 4430$. Länge der Luftzwischenräume vor beiden Polen, zusammen $l_L = 2 \cdot 0{,}6 = 1{,}2$ cm; $Z_L\, l_L = 5320$ Ampèrewindungen.

Digitized by Google

Streuung. Für den vorliegenden Magnet-Typus kann die Zahl S der Streulinien zu 23 % von N angenommen werden. In den Magnetschenkeln müssen also erzeugt werden $N + S = 2{,}59 \cdot 10^6$ Kraftlinien.

In Gl. 13a S. 31 ist bei Hufeisenmagneten mit oben liegenden Polen $k = 0{,}29$; ferner ist $d = 20{,}5$ und $l = 16{,}7$, also $\varrho = 0{,}0157$. Daher wird nach Gl. 13, wenn man darin Z für H einführt, $S = 4{,}85 \cdot 10^5$ und $S : N = 0{,}23$.

Schenkel. Nach Fig. 12b ist $s_S = 131{,}5 \cdot 15{,}5 = 200$ qcm; $\mathfrak{B}_S = \frac{N+S}{s_S} = 12950$; $Z_S = 6{,}2$. Ferner ist nach Fig. 12a und 12c $l_S = \left(31{,}4 + \frac{12{,}4}{2}\right) \cdot 2 + \left(\frac{30{,}7 + 10{,}7}{2} - 21{,}7\right) = 77{,}4$ und $Z_S\, l_S = 480$ Ampèrewindungen.

Joch. $s_J = 12{,}4 \cdot 15{,}5 = 192{,}2$ qcm; $\mathfrak{B}_J = \frac{N+S}{s_J} = 13480$ $Z_J = 7{,}5$; $l_J = \frac{37{,}0 + 10{,}7}{2} = 23{,}85$ cm; $Z_J \cdot l_J = 179$ Ampèrewindungen.

Zusammenstellung. Zur Magnetisierung sind notwendig:

für den Anker:	2289	Ampèrewindungen
für den Luftraum:	5320	Ampèrewindungen
für die Schenkel:	480	Ampèrewindungen
für das Joch:	179	Ampèrewindungen
Summe:	8268	Ampèrewindungen

Wiederholt man die Rechnung für mehrere Werte von N, so findet man für den Zusammenhang zwischen N und der aufzuwendenden Ampèrewindungszahl die in Fig. 13 gezeichnete Kurve. Diese kann als die Magnetisierungskurve des ganzen Magnetgestells bezeichnet werden und muß natürlich den allgemeinen Charakter der Magnetisierungskurven der einzelnen Stücke beibehalten. Sie ist für die Betriebseigenschaften von Motoren und Dynamos von grundlegender Bedeutung.

Überblickt man die ganze Rechnung noch einmal, so erkennt man, daß die Grundlagen derselben noch vielerlei Unsicherheiten bieten. Im Magnetgestell ist außer dem Wege der mittleren Kraftlinie, über den schon oben gesprochen wurde, auch der Querschnitt des Kraftlinienflusses in der Nähe der Pole schwer bestimmbar. Bei dem Anker gilt der in der Rechnung benutzte Querschnitt nur für den kreisförmigen Teil der mittleren Kraftlinie, für den radialen

Digitized by Google

ist er überhaupt kaum festzustellen. Während diese Unsicherheit nun bei den Schenkeln auf das ganze Resultat so gut wie garnichts ausmacht, kann sie beim Anker Fehler von einigen Prozenten hervorbringen. Dazu kommt noch die Unsicherheit in der Beurteilung der magnetischen Streuung. Das geschilderte Rechnungsverfahren ist danach wissenschaftlich sicherlich noch unbefriedigend. Für die praktische Verwendung sind dagegen seine Mängel im allgemeinen deswegen nur von geringer Bedeutung, weil die Fehler im Ergebnis in solchen Grenzen liegen, daß man sie durch eine nachträgliche Veränderung der Ampèrewindungszahl bei genügendem Platz zwischen den Schenkeln leicht korrigieren kann. Auf den

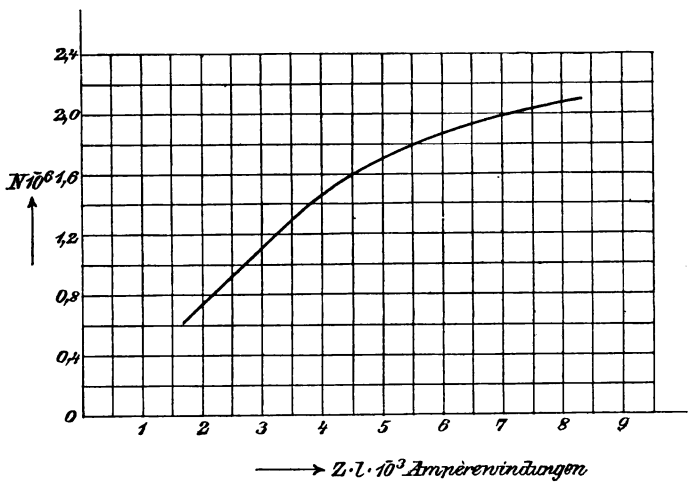


Fig. 13.

Wirkungsgrad hat diese Änderung praktisch gar keinen Einfluß, da der Arbeitsverlust in der Magnetwickelung immer sehr klein gehalten werden kann. Auch alle andern Betriebseigenschaften der Maschine bleiben davon völlig unberührt. Die Mängel des Rechnungsverfahrens zeigen sich auch nur bei dem Entwurf neuer Modelle, während bei der Vergrößerung oder Verkleinerung bekannter Typen alle grundlegenden Daten mit Leichtigkeit festgestellt werden können.

Die in diesem Abschnitte entwickelten Sätze ermöglichen es, noch eine Erscheinung rechnerisch zu verfolgen, welche bei mangelhafter Konstruktion insbesondere großer Maschinen zu ernsten Betriebsstörungen führen kann, nämlich die magnetische Zugkraft,

Digitized by Google

welche von den Polen unter Umständen einseitig auf den Anker ausgeübt wird.

Wie der in Fig. 3 gezeichnete Magnet auf das benachbarte Eisenstück, so übt auch jeder Magnetpol einer elektrischen Maschine auf das ihm gegenüber liegende Stück des eisernen Ankers eine Zugkraft aus. Ist der Anker vollkommen zentrisch gelagert, so daß der Abstand von den Polen überall gleich ist, und sind die Pole sämtlich gleich stark magnetisiert, so werden offenbar die Zugkräfte je zweier gegenüberliegender und darum auch die Kräfte aller Pole sich gegenseitig aufheben (Fig. 5, 8, 9). Liegt der Anker aber exzentrisch, etwa infolge einer Durchbiegung der Welle nach unten gesenkt, so wird der Abstand von den oberen Polen größer und die Zugkraft auf den Anker deshalb kleiner als die der unteren Pole. Die einseitige magnetische Kraft, welche unter diesen Um-

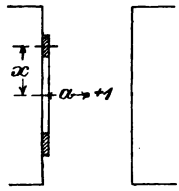


Fig. 14.

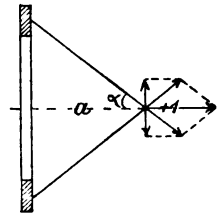


Fig. 15.

ständen auftritt, sucht also das Übel der Durchbiegung noch zu verstärken und würde mit einer Vergrößerung der Durchbiegung der Welle noch weiter wachsen.

Genau genommen ist es weniger die Veränderung des Abstandes der Ankerflächen von den Magnetpolen, welche den einseitigen Zug hervorbringt, als die Änderung der Polstärke selbst. Die magnetomotorische Kraft der Schenkelwickelungen, welche die Magnetisierung der Pole besorgt, kann nämlich nach dem Grundgesetz des magnetischen Kreises bei größerem Abstande des Ankers wegen der Erhöhung des magnetischen Widerstandes nur eine geringere Kraftlinienzahl in den Anker hineinschicken. Um zu erkennen, in welchem mathematischen Zusammenhang die Kraftlinienzahl mit der Zugkraft steht, muß man anknüpfen an das Grundgesetz der magnetischen Kraft, d. i. an Gl. 8 S. 12. Da diese Gleichung auf den Begriff der magnetischen Massen zurückgreift, so möge zunächst von der Vorstellung ausgegangen werden, daß die Polflächen sowohl wie die

Digitized by Google

gegenüberliegenden Ankerflächen gleichmäßig mit positiven und negativen magnetischen Massen belegt sind, und dann möge die Beziehung zwischen der Anzahl oder der Dichte dieser Massen und der gesamten Kraftlinienzahl gesucht werden.

Zur Vereinfachung werde angenommen, Pol- und Ankerfläche seien eben, parallel gestellt (Fig. 14), und mit σ magnetischen Massen pro qcm gleichmäßig belegt. Auf der linken Fläche, welche den Pol darstelle, seien diese Massen nordmagnetisch (+), auf der rechten, die das gegenüberliegende Ankerstück andeute, südmagnetisch (—). Es soll zunächst die Kraft berechnet werden, welche auf eine positive Masseneinheit (+ 1) zwischen Pol und Anker und im Abstand a vom Pole ausgeübt wird, wenn die Masseneinheit gerade vor der Mitte des Poles gelegen ist.

Von den Massen, welche sich auf dem Pole befinden, üben offenbar alle diejenigen eine gleich große Kraft auf + 1 aus, welche auf einem Kreise liegen, der um den Fußpunkt des Mittellotes a geschlagen wird, denn alle diese Massen haben gleiche Entfernung von + 1. Wie man leicht erkennt (Fig. 15), addieren sich die längs a gerichteten Komponenten dieser Kräfte, während die senkrecht dazu wirkenden sich aufheben. Ist x der Radius eines solchen Kreises, dx die Breite eines sehr schmalen Ringes von demselben Radius x, so ist die Zahl der auf der Fläche dieses Ringes liegenden Massen

$$dm = 2\,x\,\pi\,\sigma\,dx$$

und nach Gl. 8 die längs a gerichtete Komponente der Kraft, mit welcher sie auf + 1 abstoßend wirken,

$$dF = \frac{dm}{a^2 + x^2}\cos\alpha.$$

Setzt man hierin für dm den oben berechneten und für $\cos\alpha$ den Wert

$$\cos\alpha = \frac{a}{\sqrt{a^2 + x^2}}$$

ein, so erhält man

$$dF = 2\,\pi\,\sigma\,\frac{a\,x\,dx}{(a^2 + x^2)^{3/2}}.$$

Da ferner aus der Gleichung für $\cos\alpha$ durch Differentiation sich ergibt

$$-\sin\alpha\,d\alpha = \frac{-a\,x\,dx}{(a^2 + x^2)^{3/2}},$$

Digitized by Google

so wird einfach

$$dF = 2\pi\sigma \sin\alpha \, dx$$

und die Gesamtkraft der von dem Ringe eingeschlossenen Kreisfläche

$$F_a = 2\pi\sigma. \ (1 - \cos\alpha).$$

Liegt die Masseneinheit so nahe an der Polfläche, daß die von ihr nach den Rändern der letzteren gezogenen Verbindungslinien mit a einen Winkel von 90^0 einschließen, so erhält man die Gesamtkraft der ganzen linken Fläche, indem man $\alpha = 90^0$ setzt, zu

$$F_1 = 2\pi\sigma \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

Da aber die rechte Fläche ebenso dicht mit südmagnetischen Massen belegt gedacht ist, wie die linke mit positiven, so wirkt sie mit derselben Kraft auf $+1$ anziehend, wie die linke abstoßend, und die Gesamtkraft F_2 ist doppelt so groß wie F_1, also

$$F_2 = 4\pi\sigma.$$

Nach ihrer Bedeutung als diejenige Kraft, welche in dem Zwischenraume zwischen den beiden Magnetflächen auf eine magnetische Masseneinheit wirkt, ist F nichts anderes als die Kraftliniendichte $\mathfrak{B}$ in dem von beiden Magnetflächen gebildeten Felde.

Die Gleichung

$$\mathfrak{B} = 4\pi\sigma \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

stellt eine Beziehung her zwischen der Dichte des Kraftstromes, welcher von einem Pol zur gegenüberliegenden Ankerfläche übergeht, und der Dichte der auf diesen Flächen liegenden magnetischen Massen. Sie kann bei allen Rechnungen benutzt werden, bei denen es vorteilhaft ist, die Dichte eines Kraftliniensystems, das auf eine Eisenfläche trifft, durch die Dichte der auf letzterer vorhandenen magnetischen Massen oder umgekehrt zu substituieren.

Ist der Abstand von Pol und Anker sehr klein, so ist F_1 nicht nur die Kraft auf eine zwischen Pol und Anker gelegene, sondern auch die Kraft auf eine auf dem Anker selbst gelegene Masseneinheit. Ist Q die Größe der Oberfläche des Poles oder die Größe der von der Zugkraft getroffenen Ankerfläche und befinden sich auf der letzteren $Q\sigma$ magnetische Masseneinheiten, so wird die Gesamtkraft auf alle diese Massen oder die Zugkraft der Polfläche und auf die Ankerfläche

$$F = F_1 \cdot Q\sigma = 2\pi\sigma^2 Q.$$

Digitized by Google

Substituiert man σ nach Gl. 15 durch $\mathfrak{B}$, so erhält man

$$F = \frac{\mathfrak{B}^2 Q}{8\pi}$$

oder, da endlich $\mathfrak{B} Q$ die gesamte Kraftlinienzahl N bedeutet, welche von einer Fläche zur anderen übergeht, auch

$$F = \frac{N^2}{8\pi Q} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (16)$$

Dieses für sehr nahe aneinander liegende Flächen gültige Gesetz kann mit genügender Genauigkeit auf elektrische Maschinen angewendet werden, da hier der Abstand zwischen Pol und Anker stets der Polfläche gegenüber klein ist. Um einen konkreten Fall vor Augen zu haben, möge die Rechnungsweise für das Magnetgestell in Fig. 9 kurz betrachtet werden, in welchem vier magnetische Kreise auftreten. Hier fließt durch jeden Pol der Kraftstrom aus 2 magnetischen Kreisen, und es müßten daher entsprechend einer angenommenen Durchbiegung der Welle die mittleren Abstände zwischen dem Anker und den einzelnen Polhälften berechnet werden. Die Summe der beiden Abstände, welche von dem Kraftstrom eines magnetischen Kreises überbrückt werden, bildet die Luftstrecke desselben. Unter Benutzung dieser Zahl ist nun für jeden magnetischen Kreis entsprechend Fig. 13 eine Magnetisierungskurve zu berechnen und daraus der Kraftstrom N' zu entnehmen, welcher von der vorhandenen Ampèrewindungszahl erzeugt wird. Aus N' ergibt sich die radiale Zugkraft F jeder der beiden Polhälften, durch welche der Kraftstrom fließt, nach Gl. 16 in Dynen. Unter Benutzung des auf S. 13 gegebenen Übergangsfaktors erhält man

$$F = \frac{4 N'^2}{Q} 10^{-8} \text{ kg},$$

wobei Q als halbe Polfläche in qcm einzuführen ist. Indem man einen entsprechenden Wert für alle Polhälften berechnet und die radialen magnetischen Kräfte zu einer Resultierenden vereinigt, erhält man die verlangte Größe für den vertikalen Zug.

Digitized by Google

III. Drehmoment und Arbeitsleistung eines Gleichstromankers.

Die Triebkraft eines Elektromotors ist eine „elektromagnetische". Sie entsteht durch die Wechselwirkung zwischen einem magnetischen Felde und einem darin befindlichen vom elektrischen Strome durchflossenen Leiter nach folgendem Grundgesetz:

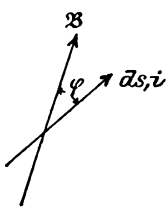


Fig. 16.

Ein Leiterelement, d. h. ein sehr kurzes Leiterstück von der Länge ds, welches von einem Strome i durchflossen wird, erfährt in einem magnetischen Felde von der Intensität $\mathfrak{B}$ eine bewegende Kraft dF, welche ds, i und $\mathfrak{B}$ proportional ist und von der Lage des Leiterelements gegenüber der Kraftrichtung des Feldes abhängt. Der Einfluſs der Lage wird gegeben durch den Sinus des Neigungswinkels φ (Fig. 16) zwischen den Richtungen von $\mathfrak{B}$ und i, so daß dF ausgedrückt werden kann durch die Gleichung

$$dF = \mathfrak{B}\, i\, ds\, \sin\varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

Die Natur dieses Vorganges kann nicht durch einfache mechanische Analogie erfafst werden, denn die Kraft dF ist weder längs der magnetischen Kraft $\mathfrak{B}$ noch längs des Stromes i oder längs der Resultierenden aus beiden gerichtet. Ihre Richtung steht vielmehr sowohl auf $\mathfrak{B}$ wie auch auf i senkrecht. Da längs des gemeinsamen Lotes aber zwei Richtungen möglich sind, so muß die wahre noch durch eine besondere Regel bestimmt werden. Von den vielen Formen, in welche man die letztere gekleidet hat, ist die folgende wohl die einfachste: Man lege den Mittelfinger der rechten Hand in die Richtung der magnetischen Kraft $\mathfrak{B}$, den Zeigefinger in die Richtung des Stromes i in ds, so gibt der Daumen, auf eine

Digitized by Google

durch $\mathfrak{B}$ und ds gelegte Ebene senkrecht gestellt, die Richtung der elektromagnetischen Kraft an.

Sieht man ab von der inneren Erklärung des Ursprunges dieser Kraft und begnügt man sich mit der Anwendung ihrer obigen einfachen Gesetze, so macht ihre rechnerische Beherrschung keine Schwierigkeiten. Sie kann nach den Gesetzen der Mechanik zerlegt oder mit anderen gleichartigen Kräften kombiniert werden, wie jede mechanische Kraft.

Die Anker der modernen Elektromotoren bestehen bekanntlich aus cylindrischen Eisenringen, welche teils nur außen (Trommelanker), teils außen und innen (Ringanker) mit Drähten umwickelt sind. Diese Drähte oder Windungen müssen so geschaltet werden, daß sich die Zugkräfte, welche sie erfahren, sämtlich zu einer tangentialen Zugkraft in gleichem Sinne addieren. Um die Bedingungen für diese Schaltung zu erkennen und das gesamte sich ergebende Drehmoment festzustellen, ist es zweckmäßig, zunächst die tangentiale Zugkraft einer einzigen Windung zu berechnen.

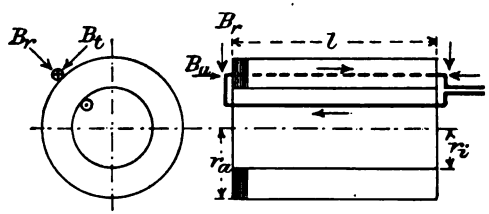


Fig. 17a. Fig. 17b.

Zu diesem Zwecke werde der in Fig. 17 gezeichnete Ringanker betrachtet, welcher den inneren Radius r_i, den äußeren Radius r_a und die Länge l habe. Da jede Ankerwindung aus je zwei achsialen und je zwei radialen Stücken besteht, so müssen nacheinander die Zugkräfte bestimmt werden, welche diese Seiten einzeln erfahren. Es soll dabei angenommen werden, daß die Stromrichtung die in Fig. 17b angedeutete ist. In Figur 17a, wo die achsialen Leiter im Querschnitt erscheinen, ist die Stromrichtung durch die Zeichen $\oplus$ und $\odot$ markiert. Der Punkt im Kreise ist dabei als Spitze eines Pfeiles gedacht und bedeutet, daß der Strom aus dem Querschnitt zum Beschauer hinfließt, während das Kreuz als das Ende der Fiederung des Pfeiles die umgekehrte Richtung bedeutet.

Digitized by Google

Die achsialen Stücke. Die in einem beliebigen Element *ds* des äußeren achsialen Leiters in beliebiger Richtung wirkende magnetische Feldstärke $\mathfrak{B}$ kann in drei Komponenten zerlegt werden, von denen die eine $\mathfrak{B}_r$ radial, die zweite $\mathfrak{B}_a$ parallel zur Achse, also längs *ds*, und die dritte $\mathfrak{B}_t$ senkrecht zu den beiden anderen, also tangential an den Kreis wirkt, welchen *ds* bei der Drehung des Ankers beschreibt. Im Felde einer jeden dieser Komponenten erfährt das betrachtete Stück des achsialen Leiters eine elektromagnetische Kraftwirkung, und die Gesamtkraft erhält man, indem man diese drei Komponenten vereinigt.

Der Winkel φ, welchen $\mathfrak{B}_r$ und $\mathfrak{B}_t$ mit einem axialen Leiterelement *ds* einschließen, beträgt 90°; zwischen $\mathfrak{B}_a$ und *ds* dagegen ist $\varphi = 0$. Während also nach Gl. 17 die durch $\mathfrak{B}_r$ und $\mathfrak{B}_t$ ausgeübten elektromagnetischen Kräfte

$$dF_r = \mathfrak{B}_r \, i \, ds \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

und

$$dF_t = \mathfrak{B}_t \, i \, ds$$

sind, wird die von $\mathfrak{B}_a$ erzeugte Kraft gleich Null. Nach der oben angegebenen Regel für die Richtung der elektromagnetischen Kraft wirkt dF_r tangential und sucht den Anker entgegen dem Uhrzeiger zu drehen, dF_t dagegen wirkt radial nach außen, übt also kein Drehmoment aus. Die einzige Kraft, welche den Anker in Rotation versetzt, ist demnach

$$dF_r = \mathfrak{B}_r \, i \, ds$$

und die ganze Zugkraft auf den äußeren achsialen Leiter ist

$$Z = \mathfrak{B}_r \, i \, l. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19)$$

Bei der Ableitung von Gl. 19 aus Gl. 18 ist stillschweigend vorausgesetzt worden, daß $\mathfrak{B}_r$ für alle Teilchen *ds* des äußeren achsialen Leiters konstant ist. Dies ist aber mit genügender Genauigkeit der Fall, denn in allen senkrecht zur Ankerachse liegenden Querschnitten des Eisengestelles einer elektrischen Maschine (wie Fig. 5, 8, 9) muß dieselbe Verteilung der Kraftlinien wiederkehren, weil für alle diese Schnittebenen dieselbe magnetomotorische Kraft vorhanden ist. Aus den früheren Betrachtungen über magnetische Kreise ergibt sich ferner, daß von der inneren Mantelfläche des Ankers in den inneren Hohlraum desselben so gut wie gar keine Kraftlinien eintreten können; denn die Kraftlinien bevorzugen wegen seiner größeren Permeabilität den Weg im Eisen, wo immer eine Luftbrücke vermieden werden kann,

Digitized by Google

und verlaufen im Anker, wie in Fig. 5, 8, 9 gezeichnet ist. Der innere achsiale Leiter wird demnach von Kraftlinien überhaupt nicht geschnitten und kann an der Erzeugung des Drehmoments keinen Anteil haben. Gl. 19 stellt also die Zugkraft dar, welche beide achsialen Leiter zusammen erzeugen.

Die radialen Stücke. Die radialen Leiter bilden mit $\mathfrak{B}_t$ und $\mathfrak{B}_a$ den Winkel $\varphi = 90^0$, mit $\mathfrak{B}_r$ dagegen $\varphi = 0$. Daher sind die entsprechenden elektromagnetischen Kräfte

$$df_t = \mathfrak{B}_t \, i \, ds$$
$$df_a = \mathfrak{B}_a \, i \, ds$$
$$df_r = 0.$$

$\mathfrak{B}_t$ gibt nach der Zeichenregel eine elektromagnetische Kraft, welche parallel zur Achse in Fig. 17b nach links wirkt, $\mathfrak{B}_a$ gibt eine solche, welche tangential verläuft und den Anker in Fig. 17a entgegen dem Uhrzeiger zu drehen sucht. Für die Rotation des Ankers ist also nur $\mathfrak{B}_a$ von Interesse.

$\mathfrak{B}_a$ bildet ein Maß für die Dichte, mit welcher die Kraftlinien aus den Polen in die Stirnfläche des Ankers eintreten. Diese Dichte ist sehr gering; denn die Kraftlinien, welche von den Polen aus zum Anker übergehen, wählen den kürzeren und direkteren Luftweg von den Polflächen in die Mantelflächen des Ankers, weil dieser geringeren magnetischen Widerstand bietet. Theorie und Messung lehren übereinstimmend, daß $\mathfrak{B}_a$ für die Bildung des Drehmomentes vernachlässigt werden kann.

Demnach wird in den radialen Leiterstücken ein Drehmoment nicht erzeugt, und die ganze tangentiale Zugkraft, welche die eine Ankerwindung erfährt, ist

$$Z = \mathfrak{B}_r \, i \, l. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (19)$$

Verfolgt man diese Triebkraft Z für die verschiedenen Stellungen der Windung im magnetischen Felde der Pole, indem man sich den Anker langsam gedreht und dabei die Windung von einem konstanten Strome i durchflossen denkt, so erkennt man aus dieser Gleichung, daß Z und daher auch das Drehmoment allein von $\mathfrak{B}_r$ abhängen. Es ist darum von Wichtigkeit, die Verteilung der radialen Komponenten der magnetischen Kraft längs der Ankerperipherie zu betrachten.

Bei allen in der modernen Technik für Gleichstrommaschinen verwendeten Magnetgestellen wechseln Nordpole und Südpole längs

Digitized by Google

des Ankerumfanges mit einander ab, so daß die Kraftlinien in den Anker abwechselnd ein- und wieder austreten. An der Grenze von je zwei Abschnitten mit verschiedener Kraftrichtung muß natürlich je eine Region vorhanden sein, in der überhaupt keine magnetische Kraft besteht. Diese achsialen Streifen, die offenbar immer in der Mitte zwischen zwei Polen liegen müssen, werden als die „neutralen Achsen" bezeichnet; sie müßten die ganzen Ankerflächen zwischen den einander zugewandten Rändern benachbarter Pole umfassen, wenn die Kraftlinien, wie bisher schematisch angenommen wurde, von den Polen zum Anker direkt in radialer Richtung übergingen (Fig. 5). In Wirklichkeit aber ist dies nur bei denjenigen Kraftlinien der Fall, die von den inneren Teilen der Polflächen ausgehen; diese Linien verlaufen nicht nur radial, sondern auch annähernd gleichmäßig dicht. In der Nähe der Ränder aber breiten sich die

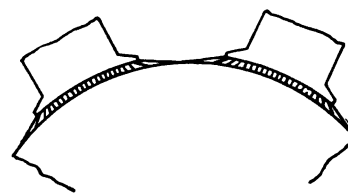


Fig. 18.

Kraftlinien „bartartig" aus (Fig. 18), und so bestehen auch zwischen den Polen magnetische Kräfte. Die radialen Komponenten der letzteren sind aber um so geringer, je mehr sich die Richtung dieser Kräfte der Tangente an den Anker nähert, je schräger sie also aus den Polrändern austreten.

Eine sehr einfache und übersichtliche Darstellung für die Verteilung der radialen magnetischen Kräfte kann man gewinnen, wenn man die Größe derselben für jeden Punkt des Ankerkreises von der Peripherie an radial nach außen aufträgt und die Endpunkte durch eine Kurve verbindet, welche im folgenden kurzweg als die „Kurve der magnetischen Kraft" bezeichnet werden soll. Auf diese Weise ist Fig. 19 gewonnen, welche die Verteilung für ein vierpoliges Magnetgestell, wie Fig. 9, darstellt. Entsprechend der wechselnden magnetischen Kraftrichtung sind diese Kurven mit Pfeilen verschiedener Richtung versehen. Die so entstehenden vier Feldabteilungen sind durch vier unendlich schmale neutrale Achsen von einander getrennt.

Digitized by Google

Fig. 19 stellt außer der Verteilung der radialen Komponenten der magnetischen Kraft nach Gl. 19 auch die Verteilung der Zugkraft oder des Drehmoments über den Ankerumfang dar, wenn der Anker ringsherum mit einzelnen Windungen von gleicher Stromstärke und Stromrichtung bewickelt ist. Gleiche Stromrichtung bedeutet hier solche Stromrichtung in jeder Windung, dafs der Strom in den allein wirksamen äußeren achsialen Leitern in gleichem Sinne fließt.

Man erkennt bei der Betrachtung von Fig. 19, daß die Zugkraft in den vier Quadranten der Ankeroberfläche abwechselnd in verschiedenem Sinne wirkt, so daß die gesamte Triebkraft Null wird. Will man erreichen, daß die Zugkräfte sich in den verschie-

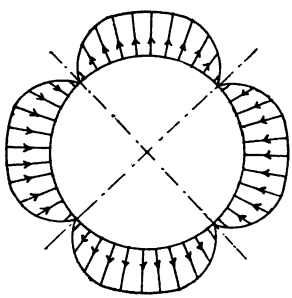


Fig. 19.

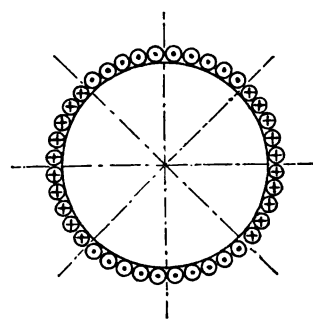


Fig. 20.

denen Quadranten addieren, so muß man bewirken, daß nicht nur $\mathfrak{B}_r$, sondern auch der Strom i in den einzelnen Quadranten abwechselnd verschiedene Richtung hat; denn wenn beide gleichzeitig ihre Richtung umkehren, so ändert sich nach der früher gegebenen Zeichenregel die Richtung der Zugkraft nicht. In Fig. 20 ist als Beispiel die Stromrichtung schematisch angedeutet, welche die äußeren achsialen Leiter des Ankers in dem Magnetfelde Fig. 19 aufweisen müssen, wenn die Ankerdrehung entgegen dem Uhrzeigersinne erfolgen soll.

Soll ein einziger Gleichstrom, von außen zugeführt, in den einzelnen Windungen in diese Richtung gebracht werden, so bedarf es dazu eines besonderen Steuerungsorganes, welches zunächst für einen zweipoligen Motor besprochen werden möge.

Bei dem letzteren liegt die Aufgabe vor, die Windungen des Ankers in 2 Hälften mit Strömen verschiedener Richtung zu speisen.

Digitized by Google

Die Forderung der verschiedenen Stromrichtung, welche oben zunächst für die achsialen Leiter aufgestellt wurde, kann auch auf die radialen bezogen und dahin ausgesprochen werden, daß an beiden Stirnflächen in der einen Ankerhälfte der Strom vorn (Fig. 21) von der Ankerachse radial nach außen, in der anderen umgekehrt von außen nach der Ankerachse zu fließe. Verteilen sich die magnetischen Kräfte nach der gestrichelten Linie in Fig. 21, so liegt die neutrale Achse, welche beide Ankerhälften trennt, horizontal.

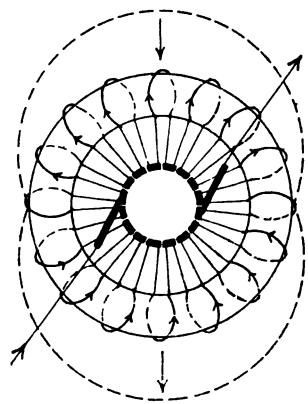


Fig. 21.

Das allgemein benutzte Steuerungsorgan, welches die gewünschte Stromverteilung herstellt, ist der „Kommutator". Um die Wirkungsweise desselben zu verstehen, denke man sich (Fig. 21) isoliert auf die Welle des Ankers eine cylindrische Buchse aus Kupfer oder Phosphorbronze geschoben, diese durch achsial geführte Schnitte in eben so viele Segmente unterteilt, wie Spulen auf dem Anker vorhanden sind, die Segmente von einander durch Glimmer isoliert, die zusammenstoßenden Enden je zweier benachbarter Spulen an dasselbe Segment geführt und auf den so entstandenen Kommutator in der neutralen Achse aufgelegt zwei unbewegliche Kupferbürsten, welche mit der Stromquelle in Verbindung stehen. Läßt man einen Strom in die linke Bürste einfließen, so spaltet er sich, wie Fig. 21 zeigt, am Ende der Bürste in zwei gleiche Teile, welche die beiden Hälften der Ankerwickelung in der verlangten Art durchfließen und als Übergang von jeder Windung in die benachbarte das entsprechende Kommutatorsegment benutzen.

Digitized by Google

Da die in Fig. 21 gezeichnete Ankerstellung eine ganz willkürliche ist, so bleibt die Stromverteilung in der oberen und unteren Hälfte aufrecht erhalten, wie auch der Anker gerade steht, und die Zugkräfte der einzelnen Spulen addieren sich bei dem stillstehenden oder laufenden Anker in jeder Lage in der geforderten Weise. Bei der praktischen Ausführung des Ankers wird man gegenüber Fig. 21 dadurch eine Vereinfachung schaffen, daß man die zusammenstoßenden Enden benachbarter Spulen nicht einzeln zum Kommutator führt, sondern schon am Ankerkörper zusammenfügt (Fig. 22) und von der Vereinigungsstelle aus nur durch eine Leitung mit dem entsprechenden Kommutatorsegment verbindet. Demnach kann der Anker mit einer in sich geschlossenen Wickelung versehen werden, von deren Windungen aus in gleichen Abständen Verbindungen zu den Kommutatorsegmenten geführt werden.

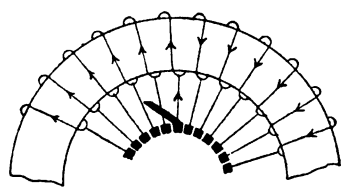


Fig. 22.

Bei mehrpoligen Motoren gelingt die richtige Steuerung des Stromes unter Benutzung derselben Einrichtung, wenn man wieder an jede neutrale Achse eine Bürste legt und diese Bürsten abwechselnd mit einander verbindet. In Fig. 23 ist die Wickelung eines 6-poligen Motors gezeichnet, bei welchem also die Aufgabe vorliegt, den Anker in 6 Abteilungen zu teilen und diesen abwechselnd verschiedene Stromrichtung zu geben. Der Kommutator ist hier weggelassen, und die Bürsten *a*, *b* schleifen direkt auf den äußeren Ankerleitern, welche außen blank zu machen, aber gegen einander und gegen das Ankergestell zu isolieren sind. Die Abwesenheit des als selbständiges Organ ausgebildeten Kommutators ändert offenbar prinzipiell nichts, denn es ist gleichgültig, ob der Strom erst, wie in Fig. 22, von der Bürste durch Kommutatorsegment und Verbindungsleitungen zur Ankerwickelung gelangt oder durch direkte Berührung der Bürste dort eintreten kann. Setzt man die in Fig. 23 mit *a* bezeichneten Bürsten mit dem positiven, die *b* mit dem negativen Pol der Stromquelle in Verbindung, so daß der Strom in *a* ein- und aus *b* wieder

Digitized by Google

austritt, so erkennt man, daß der Stromverlauf der gezeichnete ist und die Richtung in den 6 Abteilungen, wie verlangt, abwechselt. Jeder durch eine der Bürsten a eintretende Strom verzweigt sich und schickt seine beiden Hälften in verschiedenem Sinne in die benachbarten Ankerabteilungen, in den Bürsten b vereinigen sich die Ströme wieder, und durch b fließt Strom von derselben Stärke zur Quelle zurück, wie er durch a eingetreten ist. Da der gesamte aus der Stromquelle entnommene Strom sich erstens durch Verzweigung in die 3 Bürsten a in 3 Teile und hinter den Bürsten beim Übertritt in die benachbarten Abteilungen der Ankerwicke-

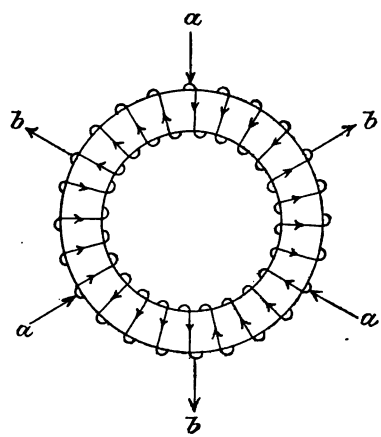


Fig. 23.

lung wieder in 2 Teile spaltet, so führt jeder Ankerdraht nur den 6. Teil des dem Motor zugeführten Gesamtstromes J. Bei Motoren von $2p$ Polen wäre also allgemein der Strom in jeder Windung

$$i = J : 2p.$$

Die soeben besprochene Schaltungsweise für die Ankerwickelung mehrpoliger Leiter heißt die „Parallelschaltung“. Sie hat allgemein die Eigentümlichkeit, daß bei $2p$ Polen durch jede Ankerwindung nur der $2p$. Teil des Gesamtstromes fließt, und wird deswegen hauptsächlich bei hohen Stromstärken angewandt. Die Notwendigkeit, starke Ströme zu benutzen, tritt nach Gl. 3 (S. 8) auf, wenn große Leistungen bei niedrigen Spannungen erreicht werden sollen. Größere Motoren für 110 Volt werden deshalb meist mehrpolig mit Parallelschaltung ausgeführt.

Digitized by Google

Die Methode der Parallelschaltung ist aber nicht die einzige, welche für mehrpolige Motoren die in Fig. 20 dargestellte Stromverteilung in den Außenleitern herzustellen ermöglicht. Statt den Gesamtstrom in die einzelnen Abteilungen der Ankerwickelungen zu verzweigen, kann man denselben Strom auch unverzweigt nach einander diejenigen Windungen durchfließen lassen, welche nach Fig. 20 Strom von gleicher Richtung zu führen haben. Diese Schaltung heißt „Serienschaltung". Bei ihr spaltet sich der Gesamtstrom J beim Eintritt aus der Bürste in den Anker nur einmal in 2 gleiche Teile, und jeder dieser beiden Ströme i durchfließt dann hintereinander die ganze Zahl gleichartiger Windungen. Hier ist also $i = \frac{J}{2}$. Die Serienschaltung wird hauptsächlich angewandt, wenn bei hohen Spannungen nur kleine Leistungen verlangt werden, also die Stromstärke nur gering zu sein braucht. Dies ist der Fall z. B. bei elektrischen Straßenbahnen, wo E_p etwa 500 Volt und die Leistung der Motoren gewöhnlich zwischen 15 und 25 P.S. beträgt.

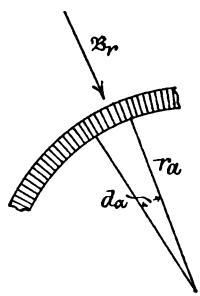


Fig. 24.

Die geschilderten Schaltungen sind auch in etwas anderer Form gebräuchlich, nämlich derart, daß jede Windung nicht nur einen Querschnitt des Ankers umschließt (Fig. 17), sondern um den ganzen Mantel des Ankers gewickelt ist und die Fläche $2\,r_a\,l$ hat. Solche Anker heißen „Trommelanker", im Gegensatz zu den bisher besprochenen, die Ringanker genannt werden. Die Betrachtung der Einzelheiten aller dieser Schaltungen hat indes nur specifisch elektrotechnisches Interesse. Für das Verständnis der allgemeinen Wirkungsweise der Elektromotoren genügt es, wenn als gemeinschaftlicher prinzipieller Zweck die in Fig. 20 für einen vierpoligen Motor dargestellte Stromverteilung festgehalten wird.

Als letzte Aufgabe bleibt nun noch die Berechnung der Zugkraft oder des Drehmoments übrig, welches der ganze Anker auf Grund dieser Verteilung ausübt. Nimmt man an, daß sich insgesamt n stromdurchflossene achsiale Leiter auf der Ankeroberfläche befinden, so umfaßt der kleine Zentriwinkel $d\,\alpha$ (Fig. 24) deren $\frac{n}{2\,\pi}\,d\alpha$. Aus der Zugkraft, welche auf jeden einzelnen äußeren

Digitized by Google

Ankerdraht wirkt (Gl. 19), ergibt sich also diejenige, welche auf das kleine von $d\alpha$ eingeschlossene Stück der Wickelung ausgeübt wird, zu

$$dZ = \mathfrak{B}_r i l \frac{n}{2\pi} d\alpha$$

und das entsprechende Drehmoment, da der äußere Ankerradius r_a ist, zu

$$dD = r_a dZ = \mathfrak{B}_r (l r_a d\alpha) i \frac{n}{2\pi}.$$

Hierin bedeutet $l r_a d\alpha$ den schmalen Streifen der Ankeroberfläche, welcher zu $d\alpha$ gehört; da ferner $\mathfrak{B}_r$ die Zahl der radial in den Anker eintretenden Kraftlinien pro qcm bedeutet, so stellt

$$\mathfrak{B}_r l r d\alpha = dN$$

die gesamte in jenen Streifen eintretende Kraftlinienzahl dar, und man erhält

$$dD = dN \cdot i \frac{n}{2\pi}.$$

Wird die totale Kraftlinienzahl, welche von einem Pole aus in den Anker übergeht, d. h. die „Polstärke", mit N bezeichnet, so ist also das Drehmoment eines Poles auf den ganzen Anker

$$D_1 = N i \frac{n}{2\pi}.$$

Schließlich wird also das gesamte Drehmoment eines Motors von p Polpaaren

$$D = N i \frac{n}{2\pi} 2p.$$

Diese Gleichung ist allgemein gültig, wie auch immer die spezielle Ankerschaltung sei, vorausgesetzt nur, daß das durch Fig. 20 dargestellte allgemeine Prinzip gewahrt bleibt.

Bei einem Motor mit Parallelschaltung, bei der $i = J : 2p$ ist, wird also

$$D = NJ \frac{n}{2\pi} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (20)$$

und bei Serienschaltung, für die $i = J : 2$ gilt, ist

$$D = NJ \frac{n}{2\pi} p \quad \ldots\ldots\ldots \quad (21)$$

Digitized by Google

Bei zweipoligen Motoren fallen Gl. 20 und 21 zusammen, da $p = 1$ ist.

In allen folgenden Betrachtungen über die Betriebseigenschaften von Elektromotoren, bei denen nicht speziell die Annahme der Serienschaltung des Ankers gemacht wird, soll Gl. 20 als die typische Formel für das Drehmoment benutzt werden. Um an diese Formel eine möglichst einfache Vorstellung zu knüpfen, empfiehlt es sich, bei den folgenden allgemeinen Darstellungen immer an einen zweipoligen Motor zu denken.

Als Hauptergebnis der in diesem Abschnitt angestellten Rechnungen wäre also festzuhalten, daß das Drehmoment eines Gleichstromankers der Polstärke N, der Stromstärke J und der Drahtzahl n proportional ist. Da n im Betriebe fast immer konstant gehalten wird, so sind also N und J zur Regulierung des Drehmoments zu benutzen. Führt man in die Gl. 20 für D die Stromstärke J in Amp. und N als absolute Kraftlinienzahl nach der früheren Definition ein, so muß man die rechte Seite mit $1{,}02 \cdot 10^{-9}$ multiplizieren, um D in mkg zu erhalten[1]). Faßt man diesen Übergangsfaktor mit 2π zusammen, so erhält man schließlich

$$D = 1{,}621 \cdot 10^{-10} N J n \text{ mkg}.$$

Als Beispiel möge das in Fig. 11 und 12 dargestellte und auf S. 33 durchgerechnete Magnetgestell betrachtet werden, bei dem $N = 2{,}1 \cdot 10^6$ ist. Wird der Anker mit $n = 240$ Drähten bewickelt und mit $J = 50$ Amp. gespeist, so wird

$$\begin{aligned} D &= 1{,}621 \cdot 10^{-10} \cdot 2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 240 \\ &= 4{,}08 \text{ mkg}. \end{aligned}$$

[1]) In Betreff dieses Übergangsfaktors s. Anhang S. 134.

Digitized by Google

IV. Elektromotorische Gegenkraft und Beziehungen zwischen Motor und Generator.

Da der im Vorangehenden abgeleitete Wert des Drehmoments sowohl für den ruhenden, wie für den rotierenden Anker gilt, so kann er als Grundlage für die Untersuchung der Betriebseigenschaften des laufenden Motors benutzt werden. Als einfachster Ausgangspunkt dient hierfür der Leerlauf.

Wenn ein stillstehender Anker vom Widerstande w plötzlich mit einer Stromquelle verbunden wird, welche an seinen Bürsten eine Spannung E_p erzeugt und aufrecht erhält, so nimmt er nach dem Ohmschen Gesetze einen Gesamtstrom J auf von der Größe

$$J = \frac{E_p}{w}.$$

Ist dieser Strom groß genug, ein Drehmoment zu erzeugen, welches die passiven Widerstände der Lagerreibung etc. zu überwinden vermag, so beginnt der Anker zu rotieren, und seine Geschwindigkeit wächst zunächst. Bleiben die passiven Widerstände unverändert, so läuft er sich schließlich auf eine solche Geschwindigkeit und eine solche Stromstärke ein, daß das dabei (nach Gl. 20) auftretende Drehmoment diese Widerstände gerade überwindet und dynamisches Gleichgewicht besteht.

Am interessantesten ist der ideale Fall des absoluten Leerlaufs, bei dem passive Widerstände überhaupt nicht vorhanden sind. Hier muß sich der Anker offenbar auf ein Drehmoment $D = 0$ einlaufen, d. h.: Wenn die Polstärke N unveränderlich ist, muß nach Gl. 20 die Stromaufnahme im dynamischen Gleichgewichtszustande des Motors auf Null herabgegangen sein.

Digitized by Google

Dieses Ergebnis scheint zunächst im Widerspruch mit dem Ohmschen Gesetze zu stehen. Wenn es richtig ist, daß unter den eben besprochenen Verhältnissen die Spannung E_p in dem Ankerwiderstand w keinen Strom mehr erzeugt, so kann das Ohmsche Gesetz in der Form

$$E_p = Jw \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (22)$$

offenbar keine Gültigkeit mehr haben. Eine Lösung dieses Widerspruches findet man, wenn man annimmt, daß durch die Rotation des Ankers auf die einströmenden elektrischen Massen ein Gegendruck ausgeübt wird, welcher sich in dem Auftreten einer entgegen E_p gerichteten elektromotorischen Kraft e äußert, und daß e bei absolutem Leerlauf gerade den Wert von E_p annimmt. Unter dieser Annahme gestaltet sich Gl. 22 um zu

$$E_p - e = Jw. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (23)$$

Die Berechtigung dieser Hypothese kann durch folgende Schlußfolgerungen kontrolliert werden: Wenn jene „elektromotorische Gegenkraft“ gleichzeitig mit der Rotation auftritt und ohne letztere nicht vorhanden ist, so muß sie auch mit ihr in kausalem Zusammenhange stehen und in der Natur des Bewegungsvorganges ihren Grund haben. Da aber bekanntlich die Bewegung von Metalldrähten in beliebigen unmagnetischen Räumen keine elektromotorischen Kräfte produzieren kann, so muß der Umstand die Ursache sein, daß die Rotation in einem magnetischen Felde vor sich geht. Hieraus ergibt sich aber weiter, daß die hypothetische elektromotorische Gegenkraft auch als selbständige E.M.K. nachweisbar sein muß, wenn die Drehung des Ankers zwischen den Magnetpolen nicht durch eingeführten Strom, sondern von Hand oder durch irgend eine Kraftmaschine geschieht.

Diese Schlußfolgerung bestätigt sich durch das Experiment. Jede Bewegung eines Leiters in einem magnetischen Felde bringt in diesem Leiter eine E.M.K. hervor, welche als „induzierte“ bezeichnet wird, und jeder Elektromotor, dessen Anker durch einen von außen zugeführten Strom in Rotation gesetzt wird, erzeugt selbst eine E.M.K., wenn man den Treibstrom abstellt und den Anker künstlich durch eine Kraftmaschine in demselben Sinne dreht. Wie die obige Theorie verlangt, ist diese E.M.K. der Richtung des früher von außen eingeführten Stromes entgegen. Schließt man die künstlich gedrehte Maschine durch einen Widerstand, so erzeugt

Digitized by Google

die „induzierte“ E.M.K. darin einen Strom, welcher ebenfalls dem Elektromotorstrom, der eine Drehung im gleichen Sinne hervorbrachte, entgegengerichtet ist.

Die Notwendigkeit dieser Beziehung zwischen Generator und Motor ergibt sich auch aus dem Gesetze von der Erhaltung der Energie. Der Strom, welchen ein rotierender Generator erzeugt, kann nur durch Arbeitsaufwand produziert werden, da er der mechanischen Arbeit äquivalente Erscheinungen, wie Wärme etc. hervorzubringen vermag. Arbeitsaufwand setzt aber Überwindung eines entgegengesetzten Drehmoments voraus, welches nur darin seine Ursache haben kann, daß der Anker des Generators im magnetischen Felde auch als Motoranker wirkt und als solcher sich entgegengesetzt zu drehen strebt, als er in Wirklichkeit von außen gedreht wird. Stellt man die mechanische Triebkraft des Generators ab und schickt man Strom aus einer äußeren Quelle im Sinne des eben erzeugten Stromes in den Anker, so kann der Anker den früher erstrebten Drehungssinn thatsächlich annehmen. Als Motoranker in diesem umgekehrten Sinne laufend, bleibt er aber gleichzeitig ein Generatoranker und erzeugt als solcher auch eine umgekehrte E.M.K. als früher, d. i. eine der Stromrichtung entgegengesetzte oder eine E.M. Gegenkraft.

Am eklatantesten kann man die geschilderte Wechselwirkung zeigen, indem man einen laufenden Motor plötzlich von seiner Stromquelle abschaltet und den Anker durch einen kurzen und dicken Leiter „kurz schließt“. Der Strom, welchen der Motor jetzt als Generator erzeugt, wirkt der Drehung, welche die lebendige Kraft aufrecht zu erhalten strebt, entgegen, und zwar so kräftig, daß der Anker mit einem Ruck stillsteht. Die Ausnutzung dieser Erscheinung für plötzliche Bremsung von Motoren wird später behandelt werden.

Die Bilanz der einem laufenden Motor zugeführten Energie erhält man in einfacher Weise aus Gl. 23, indem man diese auf die Form bringt:

$$E_p = J w + e \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (24)$$

und auf beiden Seiten mit J multipliziert, sodaß man erhält

$$E_p J = J^2 w + e J \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (25)$$

Gl. 24 bedeutet, daß von der gesamten Spannung E_p, welche dem Anker von außen zugeführt wird, der Teil $J w$ aufzuwenden ist,

Digitized by Google

um den Ankerstrom durch den Ankerwiderstand zu treiben, während der andere Teil zur Überwindung der E.M. Gegenkraft dient. Gl. 25 ergibt daraus $E_p J$ als die gesamte dem Anker sekundlich zugeführte Arbeit, und $J^2 w$ als die Arbeit, welche zum Durchtrieb des Stromes durch den Ankerwiderstand verbraucht und in Wärme umgesetzt wird. Als einzig übrig bleibende Größe ist also eJ die elektrische Arbeit, welche sekundlich in mechanische umgesetzt wird.

Aus der durch eJ bestimmten mechanischen Leistung des Motors und derjenigen, welche man aus dem früher festgestellten Drehmoment berechnet, kann man leicht die Größe von e ableiten. Wird die Winkelgeschwindigkeit des Ankers mit ω bezeichnet, so ist

$$eJ = D\omega \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (26)$$

Führt man hierin statt ω die sekundliche Tourenzahl v des Ankers unter Benutzung der Beziehung

$$\omega = 2\pi v$$

ein und für D den in Gl. 20 gegebenen Wert, so erhält man

$$eJ = NJ\frac{n}{2\pi} 2\pi v$$

und

$$e = Nnv. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (27)$$

Dieses Ergebnis bestätigt die allgemeinen Schlußfolgerungen, welche schon oben in Bezug auf die Natur der induzierten E.M.K. gezogen wurden, und lehrt, daß e bei gegebener Ankerdrahtzahl der Polstärke und der Drehgeschwindigkeit einfach proportional ist. Gl. 27 bildet mit Gl. 20 und Gl. 24 zusammen die Grundgesetze des Elektromotors, aus denen die Betriebseigenschaften aller Typen in einfachster Weise abzuleiten sind. Gl. 27 kann ebenfalls für die Berechnung der E.M.K. eines Generators benutzt werden. Will man diese in Volt erhalten, so muß der Übergangsfaktor 10^{-8} eingeführt, also

$$e = 10^{-8} Nnv \text{ Volt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (28)$$

gesetzt werden[1]).

An der Entwickelung dieser E.M.K. haben natürlich alle äußeren Ankerdrähte ihren Anteil. Um die Größe dieses Anteils e_1 für einen

[1]) In Betreff dieses Übergangsfaktors s. Anhang S. 133.

Digitized by Google

jeden einzelnen äußeren achsialen Draht zu erkennen, kann man wieder die elektrische Arbeit $e_1 J$, welche in jenem Drahte sekundlich in mechanische umgesetzt wird, dem mechanischen Arbeitsbetrag gleich setzen. Bildet man die mechanische Leistung als Produkt der Zugkraft Z und der absoluten Geschwindigkeit g des Leiters, welche zugleich die Umfangsgeschwindigkeit des Ankers ist, so erhält man

$$e_1 J = Z g$$

und wenn man für Z den in Gl. 19 (S. 42) angegebenen Betrag einsetzt,

$$e_1 J = \mathfrak{B}_r J l g$$

und

$$e_1 = \mathfrak{B}_r l g \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (29)$$

Um e_1 in Volt zu erhalten, muß man wiederum den Übergangsfaktor 10^{-8} einführen.

Wie die nähere Rechnung zeigt, führt dieser Wert von e_1, wenn er für alle achsialen Außenleiter addiert wird, rückwärts zu der gesamten im Anker induzierten E.M.K. $e = 10^{-8} N n v$. Es werden also weder in den achsialen Innenleitern, noch in den radialen Drähten elektromotorische Kräfte induziert.

Nach Gl. 29 ist bei konstanter Tourenzahl die Verteilung der pro Draht induzierten E.M.K. um den Ankerumfang wie die des Drehmoments durch die Verteilungskurve der radialen Komponenten der magnetischen Kraft (Fig. 19) gegeben.

Digitized by Google

V. Magnet-Motor und Magnet-Generator.

Unter Magnet-Motor und -Generator sollen hier Maschinen mit permanenten Magneten verstanden werden, wie sie auch in den beiden vorangehenden Abschnitten stillschweigend vorausgesetzt wurden. Dieser Maschinentypus hat zwar an sich wenig praktische Bedeutung, da er heutzutage nur in Exemplaren von sehr kleiner Leistung verwendet wird. Seine Betriebseigenschaften bilden aber die Grundlage des Verhaltens aller anderen Typen mit besonderer Erregung und werden daher zweckmäßig vor diesen betrachtet.

Die normale Arbeitsweise aller Elektromotortypen ist heutzutage der Betrieb mit konstanter Spannung. Dies begründet sich durch die Art der Stromlieferung von der Zentrale an die Verbrauchsstellen. Die Verteilungssysteme für elektrische Energie lassen sich prinzipiell in zwei Gruppen teilen, nämlich in die mit Reihen- und die mit Parallelschaltung. Unter ersterer versteht man diejenige Schaltung, bei der sich eine Konsumstelle derart an die andere reiht, daß derselbe Strom alle Konsumstellen hintereinander durchfließt. Dieses System hat den Nachteil, daß der Strom, wenn er an einer einzigen Stelle durch eine Betriebsstörung unterbrochen wird, gleichzeitig auch an allen übrigen aufhört. Bei der Parallelschaltung dagegen werden Hin- und Rückleitung über das ganze Verbrauchsgebiet neben einander hergeführt und jede Verbrauchsstelle wird an beide Leitungen angeschlossen, so daß sich der Strom der Zentrale in die einzelnen Anlagen verzweigt. Dieses Verteilungssystem ist aufzufassen wie ein Druckrohrnetz mit vielen Abzweigungen und weicht infolge der Natur des elektrischen Stromes nur dadurch von jenem ab, daß jede Abzweigung nicht nur an eine Zuleitung des Stromes, sondern außerdem an eine genau ebenso beschaffene Rückleitung angeschlossen werden muß. Wie in jenem Falle allen Ver-

Digitized by Google

brauchsstellen möglichst konstanter Druck, so muß auch bei den elektrischen Anlagen jeder Abzweigung möglichst konstante Spannung gegeben werden. Die Annahme, daß E_p konstant ist, kann daher allen weiteren Betrachtungen zu Grunde gelegt werden.

Die folgende Darstellung knüpft an die Formeln an:

$$\text{I.} \quad E_p = Jw + e$$

$$\text{II.} \quad e = Nnv$$

$$\text{III.} \quad D = \frac{NnJ}{2\pi},$$

welche als die drei Grundgesetze der Elektromotoren bezeichnet und in der Reihenfolge ihrer obigen Zusammenstellung numeriert werden sollen. Aus ihnen ergibt sich das Verhalten des Magnetmotors unter der Voraussetzung, daß N als Polstärke des Magnetgestelles und n und w als Konstruktionsdaten des Ankers unveränderlich sind, in den verschiedenen Betriebszuständen, wie folgt:

Anlauf.

Wenn der Anker des stillstehenden Motors plötzlich mit den Stromzuleitungen von der Spannungsdifferenz E_p verbunden wird, so entsteht in ihm zunächst ein Strom nach dem Ohmschen Gesetz

$$E_p = Jw, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (30)$$

da die E.M. Gegenkraft e noch Null ist. In demselben Maße, wie sich die letztere mit zunehmender Geschwindigkeit v nach dem zweiten Grundgesetz entwickelt, nimmt J nach dem ersten Grundgesetz ab und fällt bis auf denjenigen Wert, welcher nach dem dritten Grundgesetz dauernd das vorhandene Gegenmoment D überwindet. Da also der im ersten Augenblicke vorhandene Ankerstrom weit stärker ist, als für den Dauerbetrieb bei der vorhandenen Belastung notwendig ist, so kann er dem Anker eine große Beschleunigung geben, und dieser wird mit großer Geschwindigkeit anlaufen.

Das für manche Betriebszwecke sehr erwünschte große Anlaufsmoment kann aber von einem Strome begleitet sein, welcher für den Anker unzulässig hoch ist. Die Größe, welche dieser Strom bei modernen Motoren annimmt, kann man leicht durch Betrachtung der Gleichung 25 (S. 54) für die Energieverteilung im Motor er-

Digitized by Google

kennen. Bei modernen Typen gehen bei voller Belastung etwa 2 bis 5 % der gesamten Effektaufnahme im Anker verloren, d. h. es ist

$$\frac{J^2 w}{E_p J} = 0{,}02 \text{ bis } 0{,}05$$

und

$$J w = {}^1/_{50} \text{ bis } {}^1/_{20} E_p.$$

Während Jw bei normalem Betriebe also im ungünstigsten Falle den 20. Teil von E_p betrüge, würde es bei Anlauf nach Gl. 30 den Wert von E_p selbst erreichen. Da die Wickelung der Motoren natürlich für ihren normalen Betrieb berechnet wird, so ist eine Stromaufnahme vom 20 fachen Betrage des zu Grunde gelegten Wertes durchaus unzulässig.

Der Anlaufstrom J muß also durch Vorschaltung eines Regulierwiderstandes ϱ reduziert werden. Bei der Benutzung eines solchen ergibt sich J aus der Gleichung

$$E_p = J(w + \varrho).$$

Hat ϱ z. B. den 19 fachen Wert von w, so wird wieder

$$J w = {}^1/_{20} E_p,$$

d. h. der Anlaufstrom wird auf den normalen Betriebsstrom herabgedrückt. Während des Anlassens muß ϱ natürlich in dem Maße vermindert werden, wie die E. M. Gegenkraft steigt, und bei normalem Betriebe des Motors ganz ausgeschaltet sein. Aus diesem Grunde wird ϱ gewöhnlich als Kurbelwiderstand konstruiert und als „Anlaßwiderstand“ oder kurz als „Anlasser“ bezeichnet.

Strom- und Effektaufnahme des laufenden Motors.

Aus der Bilanzgleichung für die Energieverteilung im Motor

$$E_p J = J^2 w + e J$$

ergibt sich die Beziehung zwischen der sekundlichen Arbeitsaufnahme $E_p J$ und derjenigen Arbeit, welche sekundlich in mechanische umgewandelt wird: eJ. Wir setzen von jetzt an der Kürze halber

$$E_p J = A$$

und

$$e J = A_e,$$

so daß

$$A = J^2 w + A_e$$

Digitized by Google

ist. Man erkennt daraus, daß die volle aufgenommene elektrische Energie in mechanische umgewandelt würde, wenn sich ein widerstandsloser Anker herstellen ließe. In diesem Falle würde A als Funktion von A_e, in gleichem Maßstabe graphisch aufgetragen, als eine unter 45^0 gegen die Abszisse geneigte Gerade erscheinen, wie $O'A$ in Fig. 25. Wegen der Verluste im Anker, die mit der Stromaufnahme quadratisch zunehmen, steigt aber A schneller als $O'A$ an, etwa wie $O'B$.

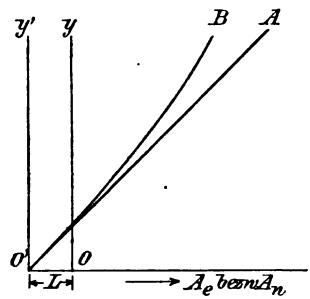


Fig. 25.

In Wirklichkeit ist indes die Ausnutzung der zugeführten Energie noch geringer, weil wegen der passiven Widerstände des Motors, als Lagerreibung, Friktion des rotierenden Ankers gegen die umgebende Luft etc., nicht der ganze Wert von A_e an der Welle frei wird. Da die Geschwindigkeit des Motors sich mit der Belastung nur wenig ändert und nach neueren Untersuchungen[1]) die Lagerreibung vom Achsdruck nahezu unabhängig ist, so kann die zur Überwindung der passiven Widerstände aufzuwendende Arbeit L als konstant und unabhängig von der Leistung des Motors betrachtet werden. Wird die wirklich nutzbar gemachte Arbeit mit A_n bezeichnet, so ist also

$$A_e = L + A_n$$

und

$$A = J^2 w + L + A_n \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (31)$$

Indem man (Fig. 25) parallel zu $O'Y'$ im Abstande $OO' = L$ die neue Ordinatenachse OY zieht und die Abszisse A_n von O aus zählt, gewinnt man die graphische Darstellung für die Abhängigkeit der Effektaufnahme des Motors von der Nutzleistung. Da E_p als konstant

[1]) Vergl. Bach, Lehrbuch der Maschinenelemente, 3. Aufl., S. 305.

Digitized by Google

angenommen ist, so stellt dieselbe Figur gleichzeitig auch die Abhängigkeit der Stromaufnahme von der Nutzleistung dar.

Für die Leerlaufsarbeit A_0, bei der $A_n = 0$ ist, ergibt sich nach Gl. 31 der Wert

$$A_0 = J_0^2 w + L.$$

Hierbei ist $J_0^2 w$ stets nur so klein, daß mit genügender Annäherung

$$A_0 = A$$

gesetzt werden kann[1]).

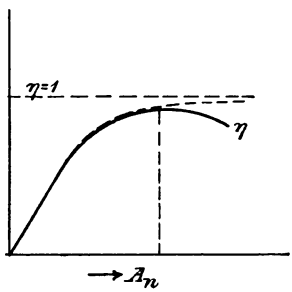


Fig. 26.

Der Wirkungsgrad η ergibt sich zunächst unter der Voraussetzung, daß bei allen Belastungen $J^2 w$ vernachlässigt werden kann, zu

$$\eta = \frac{A_n}{L + A_n}.$$

Als Funktion von A_n betrachtet, ist η nach dieser Gleichung eine Hyperbel, deren Ordinaten sich asymptotisch dem Werte 1 nähern (gestrichelte Kurve in Fig. 26). Der Verlust $J^2 w$ drückt den Wirkungsgrad aber noch herab, und zwar um so mehr, je größer J oder auch die Nutzleistung ist. Bei sehr hohen Belastungen, also sehr großen Werten von J, kann der Wirkungsgrad wieder abfallen, bei mangelhafter Konstruktion des Motors sogar schon vor Erreichung der normalen Leistung (ausgezeichnete Kurve in Fig. 26). Gute Motoren zeigen den höchsten Wirkungsgrad gerade bei normaler Belastung, und die Kurve für η ist in der Nähe dieses Punktes so flach, daß der Wirkungsgrad sich zwischen $^3/_4$ und $^5/_4$ der normalen Belastung nur wenig ändert.

---

[1]) Ein Beispiel folgt im nächsten Abschnitte.

Digitized by Google

Selbstregulierung der Tourenzahl.

Um die Abhängigkeit der Tourenzahl von der Belastung festzustellen, ist es zweckmäßig, von dem absoluten Leerlauf auszugehen, bei dem $D = 0$ und daher $J = 0$ ist und $e = E_p$ wird. Aus der Bedingung $e = E_p$ ergiebt sich ein bestimmter Wert für die Tourenzahl v, d. h. der Motor muß bei absolutem Leerlauf eine solche Geschwindigkeit annehmen, daß er eine E.M.K. entwickelt, die gerade den Wert E_p hat. Im Hinblick darauf, daß der Anker unter diesen Umständen keinen Strom aufnimmt, kann gesagt werden: die E.M. Gegenkraft des Motors balanciert die Klemmenspannung desselben genau aus.

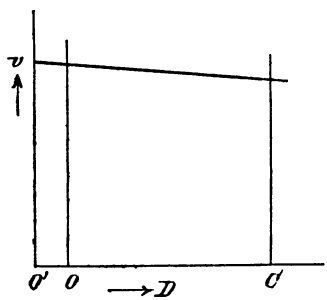


Fig. 27 a.

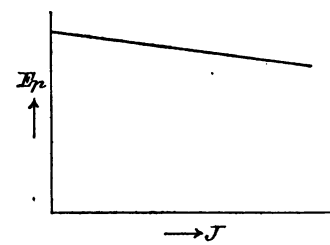


Fig. 27 b.

Sobald der Motor belastet wird, stellt sich entsprechend dem auszuübenden Drehmomente eine bestimmte Stromstärke ein, und es tritt dadurch im Anker ein Spannungsverlust Jw auf. Jetzt muß nach Grundgesetz I und II der Motor sich auf eine solche Tourenzahl einlaufen, daß er eine E.M.K. entwickelt, welche gleich der Klemmenspannung vermindert um diesen Spannungsabfall ist. Die Tourenzahl nimmt also bei wachsender Belastung proportional Jw oder D ab. v, als Funktion von D gezeichnet, wird eine abfallende gerade Linie, wie in Fig. 27a dargestellt ist.

Der Vorgang der Tourenbildung, wie kurz gesagt werden mag, läßt sich bei allen Motortypen am leichtesten verstehen, wenn man sich gegenwärtig hält, daß dem Motor bei gegebener Spannung entsprechend der Stromstärke, welche er aufnehmen muß, um das durch die Belastung bedingte Drehmoment herzustellen, die Ausbildung einer bestimmten E.M. Gegenkraft nach Grundgesetz I aufgezwungen

Digitized by Google

wird. Er muß so schnell laufen, daß er der Klemmenspannung E_p bis auf den Spannungsabfall im Anker die Balance hält.

Wird eine Magnetmaschine als Generator verwandt und mit derselben Geschwindigkeit in demselben Sinne gedreht, wie sie vorher als Motor lief, so erzeugt sie eine E.M.K., welche gleich groß und gleich gerichtet ist der E. M. Gegenkraft des Motors. Wird der Generator durch einen äußeren Widerstand geschlossen, so erzeugt diese Gegenkraft auch einen Strom von entgegengesetzter Richtung des Motorstromes. Aus dem ersten Grundgesetz des Elektromotors erhält man, indem man J durch $-J$ ersetzt, die Gleichung

$$e = Jw + E_p,$$

d. h. an dem Generator entsteht eine Klemmenspannung, welche gleich der induzierten E.M.K. vermindert um den Spannungsabfall im Anker ist. E_p nimmt also mit wachsender Stromentnahme aus der Maschine linear ab (Fig. 27b), wie v in Fig. 27a. Für e gilt wieder die Gleichung

$$e = N n v$$

und für D

$$D = N J \frac{n}{2\pi} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (32)$$

D ist hierbei das Drehmoment, welches die treibende Kraftmaschine beim Antrieb des Generators zu überwinden hat.

Die hier zusammengestellten Formeln können als die Grundgleichungen des Gleichstromgenerators betrachtet werden. Fig. 27b heißt die Spannungscharakteristik der Magnetmaschine.

Aus der vorangehenden Darstellung ergeben sich leicht die Grenzen der zulässigen Belastung des besprochenen Maschinentypus. Die Zugkraft des Motors kann theoretisch langsam so weit gesteigert werden, bis er stillsteht. Praktisch ist nur eine Grenze gesetzt durch die Erwärmung der Ankerwickelung bei zu großer Stromstärke. Für kurze Dauer kann der Motor also wesentlich überlastet werden. Beim Generator andererseits darf die Stromentnahme theoretisch zunächst so weit gesteigert werden, wie es die Zugkraft der Antriebsmaschine nach Gl. 32 zuläßt. Praktisch zieht auch hier die Erwärmung des Ankers eine Grenze.

Digitized by Google

VI. Nebenschluſs-Motor und Nebenschluſs-Generator.

Die Verwendung permanenter Magnete bei Elektromotoren hat den Nachteil, daß eine absolute Konstanz dieser Magnete nicht erreichbar ist und mit der Magnetisierung sich auch die Betriebseigenschaften der Motoren verändern. Außerdem fehlt hier die Möglichkeit, die Tourenzahl durch Änderung der Magnetisierung zu regulieren.

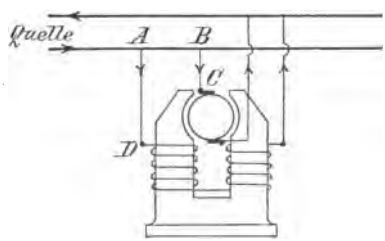


Fig. 28.

Man verwendet deshalb heutzutage, abgesehen von ganz kleinen Motortypen, bei denen die Einfachheit der Konstruktion das Wichtigste ist, ausschließlich Magnetgestelle, die nur während des Betriebes durch den Strom magnetisiert werden und zu diesem Zwecke nach den auf S. 23—26 abgeleiteten Gesetzen zu bewickeln sind.

Für die Speisung der Magnetwickelung mit Strom bestehen verschiedene Möglichkeiten. Am nächsten liegt es offenbar, den Magnetisierungsstrom aus derselben Stromquelle oder derselben Verteilungsleitung zu entnehmen wie den Ankerstrom. Auf diese Weise entsteht die in Fig. 28 gezeichnete Schaltung. Die beiden Ströme werden hier bei *A* und *B* aus der unteren, mit der Stromquelle in Verbindung stehenden Verteilungsleitung abgezweigt und fließen

Digitized by Google

beide durch die obere Leitung zur Quelle zurück. Die Magnetwickelung bildet dabei einen „Nebenschluß“ zum Anker, und der Motor heißt deshalb Nebenschluß-Motor.

Wenn man die Magnetwickelung eines Nebenschluß-Motors so einrichtet, daß die Pole genau ebenso stark werden wie bei einem ebenso gebauten Motor mit permanenten Magneten, so verhalten sich beide Typen vollkommen gleich. Anlauf und Betrieb gehen in genau derselben Weise vor sich, und nur darin besteht ein Unterschied, daß bei dem Nebenschlußmotor zu dem Ankerstrom noch der Magnetisierungsstrom oder „Erregerstrom“ der Feldmagnete hinzukommt und bei der Aufstellung der Energiebilanz zu berücksichtigen ist.

Strom- und Energieaufnahme des Nebenschluſs-Motors.

Der Gesamtstrom J, welcher dem Nebenschluß-Motor zugeführt werden muß, ist nicht mehr gleich dem Ankerstrom wie beim Magnetmotor, sondern um den Erregerstrom größer. Zur Unterscheidung sollen Ankerstrom und -Widerstand in diesem Abschnitte mit dem Index a, Erregerstrom und Widerstand mit n (Nebenschluß) bezeichnet werden.

Dann ist die sekundliche Arbeitsaufnahme des belasteten Ankers nach Gl. 31

$$J_a^2 w_a + L + A_n$$

und die von J_n in der Magnetwickelung sekundlich geleistete Arbeit, wenn die gemeinsame Spannung wieder mit E_p bezeichnet wird, nach Gl. 3 (S. 9)

$$E_p J_n.$$

Andererseits ist die vom Gesamtstrome J im Motor geleistete oder die totale sekundlich vom Motor aufgenommene Arbeit

$$A = E_p J,$$

so daß die Bilanzgleichung schließlich lautet:

$$A = E_p J = J_a^2 w_a + E_p J_n + L + A_n \quad . \quad . \quad . \quad (33)$$

Man entnimmt hieraus, daß J_n möglichst klein oder der Widerstand der Erregerwickelung möglichst groß sein muß, wenn die Magnetisierung möglichst wenig Arbeit kosten soll, und man muß daher, um die nötige Ampèrewindungszahl zu erhalten, die Schenkel mit vielen möglichst dünnen Windungen magnetisieren.

Digitized by Google

Zur Veranschaulichung der Verteilung der Energiegrößen in einem modernen Motor möge hier ein Beispiel folgen.

Ein 6pferdiger Nebenschluß-Motor, dessen Magnetgestell das in Fig. 11 und 12 (S. 32) dargestellte ist, wurde vom Verfasser untersucht und zeigte bei $E_p = 106{,}5$ Volt einen Erregerstrom von $J_n = 1{,}05$ Amp. und, leer laufend, einen Ankerstrom von $J^0{}_a = 4{,}35$ Amp. Der Ankerwiderstand war $w_a = 0{,}118$ Ohm. Die gesamte Stromaufnahme betrug also

$$J^0 = J_a{}^0 + J_n = 5{,}40 \text{ Amp.}$$

Setzt man diese Werte in die Bilanzgleichung für Leerlauf ein, welche — da $A_n = 0$ ist — lautet:

$$A^0 = E_p J^0 = J_a{}^{0\,2} w_a + E_p J_n + L,$$

so erhält man die Gleichung

$$575{,}1 = 2{,}2 + 111{,}8 + L$$

und hieraus $L = 461{,}1$ Watt.

Da die normale Leistung des genannten Motors $A_n = 6$ P.S. $=$ 4416 Watt beträgt, so verbraucht dieser zum Leerlauf davon (575,1 =) 13,0%, und von dieser Leerlaufsarbeit kommen etwa $^1/_5$ auf die Unterhaltung der Magnetisierung der Schenkel und $^4/_5$ auf die Überwindung der passiven mechanischen Bewegungswiderstände. Die in der Ankerwickelung verloren gehende Energie ist dagegen ganz zu vernachlässigen.

Aus diesen Daten für den Leerlauf kann man das Verhalten des Motors für alle Belastungen mit einer für die meisten Zwecke genügenden Genauigkeit im voraus berechnen, wenn man bedenkt, daß in die Bilanzgleichung für den belasteten Motor die Größe $E_p J_n + L = 573$ Watt aus den Leerlaufsdaten unverändert zu übernehmen ist. Als Beispiel mögen Stromaufnahme, Effektaufnahme und Wirkungsgrad für die normale Leistung $A_n = 6$ P.S. $= 4416$ Watt bestimmt werden.

Da J_a noch nicht bekannt ist, möge in erster Annäherung $J_a = 0$, also

$$A = E_p J \sim E_p J_n + L + A_n$$

gesetzt werden. Führt man hierin $A_n = 4416$ Watt, $E_p J_n + L = 573$ Watt und $E_p = 106{,}5$ Volt ein, so erhält man

$$J \sim 46{,}84 \text{ Amp.}$$

Digitized by Google

Hiervon den konstant bleibenden Magnetisierungsstrom $J_n = 1{,}05$ Amp. subtrahierend, bekommt man

$$J_a \sim 45{,}79 \text{ Amp.}$$

Dieser Annäherungswert kann nun in die wahre Bilanzgleichung (33) eingesetzt werden, und man erhält in zweiter Annäherung

$$J \sim 49{,}16 \text{ Amp.}$$

Eine weitere Annäherung in gleicher Weise ergibt schließlich

$$J = 49{,}41 \text{ Amp.}$$

und

$$A = E_p J = 5262 \text{ Watt},$$

welche Werte als genügend genau betrachtet werden können. Der Wirkungsgrad wird dabei

$$\eta = \frac{A_n}{A} = 83{,}9\,\%,$$

und die Schlußbilanz wird

$$\begin{array}{rcl} A & = & J_a^2 w_a + E_p J_n + L + A_n \\ 5262 & = & 273 + \underbrace{112 + 461}_{573} + 4416 \end{array} \quad \ldots \quad (34)$$

Wünscht man nicht für einen bestimmten Wert von A_n die Rechnung durchzuführen, sondern über den ganzen Bereich der Leistung des Motors hinweg die Abhängigkeit der Größen J, A und η von A_n graphisch darzustellen, so thut man am besten, von verschiedenen Werten von J_a auszugehen, daraus J und A, dann A_n und schließlich η zu berechnen.

Die geschilderte Art der Vorausberechnung gibt mit der Wirklichkeit genügende Übereinstimmung. Eine Quelle für Abweichungen besteht, abgesehen von Änderungen der mechanischen Lagerreibung etc., im wesentlichen nur in der Erwärmung der Anker- und Magnetwickelungen durch den Strom. Die Erwärmung aller kupfernen Leiter hat nämlich eine Erhöhung ihres Widerstandes zur Folge, welche pro Celsiusgrad Temperaturerhöhung etwa $^1/_3\,\%$ beträgt. Durch diese Widerstandszunahme ändert sich aber die vorhin berechnete Arbeitsbilanz je nach dem Grade der Erwärmung. Wenn sich nun auch die Wärmemenge, welche der Strom erzeugt, in Kalorien nach Gl. 7 (S. 10) leicht bestimmen läßt, so ist doch der

Digitized by Google

Zusammenhang zwischen derselben und der dadurch erzeugten Temperaturerhöhung wärmetheoretisch, wie bei allen Maschinen, so verwickelt, daß er nur durch Erfahrungszahlen roh berechnet werden kann. Diese können indes nur ein speziell elektrotechnisches Interesse beanspruchen.

Die Regulierung der Tourenzahl.

Wenn man den Magnetisierungsstrom eines Nebenschlußmotors während des Betriebes unverändert läßt, so nimmt die Tourenzahl aus demselben Grunde, wie beim Magnetmotor mit wachsender Belastung linear ab (Fig. 27a). Bei dem vorangehenden Beispiel, wo der Ankerstrom bei Leerlauf $J_a{}^0 = 4{,}35$ und bei Vollbelastung $J_a = J - J_n = 49{,}41 - 1{,}05 = 48{,}36$ ist, ergibt sich $J_a{}^0 . w_a = 0{,}5$ und $J_a . w_a = 5{,}7$. Die E.M. Gegenkraft wird also im ersteren Falle $e = E_p - J_a{}^0 w_a = 106{,}5 - 0{,}5 = 106{,}0$ und im letzteren $e = 106{,}5 - 5{,}7 = 100{,}8$ und die Tourenzahlen bei Vollbelastung und Leerlauf verhalten sich wie $100{,}8 : 106{,}0 = 0{,}951$. Die Drehgeschwindigkeit nimmt also nur um 4,9% ab; d. h. der Nebenschlußmotor reguliert sich annähernd selbst.

Es wäre nun die Frage zu beantworten, auf welche Weise die geringe Tourenabnahme noch verhindert werden kann. Zu diesem Zwecke muß Grundgesetz II ins Auge gefaßt werden, in welchem allein v vorkommt. Die Betrachtung dieses Gesetzes zeigt als einziges Mittel eine Verkleinerung von N in demselben Verhältnis, in welchem v zunehmen soll. Sachlich bedeutet dies: Man hat die Stärke des Magnetfeldes zu vermindern, damit der Anker sich desto schneller drehen muß, um die durch Grundgesetz I vorgeschriebene E.M. Gegenkraft entwickeln zu können. Dieses Mittel erscheint aber deswegen zunächst von zweifelhaftem Erfolge, weil mit der Polstärke N nach dem dritten Grundgesetz eine Verkleinerung des Drehmoments D eintritt und daher eher eine Verringerung als eine Vergrößerung der Tourenzahl erwartet werden muß.

Dieser Widerspruch löst sich, wenn man gleichzeitig mit der Veränderung von N auch diejenige von J betrachtet und insbesondere den ersten Moment nach der Verminderung der Feldstärke ins Auge faßt. Es möge angenommen werden, der Motor drehe sich normal belastet mit dem vorhin berechneten Tourennachlaß von 4,9% gegenüber Leerlauf, und die Polstärke werde nun durch entsprechende Verringerung

Digitized by Google

des Erregerstromes plötzlich um 4,9% herabgesetzt. Ehe die Tourenzahl die entsprechende Veränderung vornehmen kann, geht auch e nach Grundgesetz II um denselben Betrag, d. h. von 100,8 Volt auf 95,86 Volt herunter. Bleibt die Klemmenspannung dabei auf $E_p = 106{,}5$ Volt konstant, so hat dies eine plötzliche, sehr starke Steigerung der Stromstärke zur Folge, denn, setzt man die vorliegenden Werte in Grundgesetz I ein, so erhält man

$$106{,}5 = J_a \cdot 0{,}118 + 95{,}86.$$

Dies ergibt für J_a den Wert von 90,2 Amp., während J_a vor der Regulierung der Feldstärke nur den Wert 48,36 Amp. hatte.

Dieses plötzliche gewaltige Anwachsen von J_a, während N nur um 4,9% abgenommen hat, bewirkt nach Grundgesetz III momentan eine sehr starke Steigerung des Drehmomentes, und der Anker bekommt eine große Beschleunigung. Durch die Zunahme der Geschwindigkeit wird aber nach II sofort e erhöht und nach I J_a wieder herabgedrückt. Die Beschleunigung hört offenbar auf, wenn mit J_a das Drehmoment auf denjenigen Wert gefallen ist, welcher vor der Regulierung vorhanden war und bei der vorhandenen Belastung des Motors dem dynamischen Gleichgewicht entspricht. Nach dieser Feststellung läßt sich der Wert von J_a leicht ausrechnen, welcher nach der Regulierung dauernd bestehen bleibt. Da N um 4,9% vermindert worden ist, muß sich J_a um eben so viel erhöhen, damit D den alten Wert behält. J_a steigt also von 48,36 auf 50,73 Amp. an, und hieraus folgt $J_a w_a = 6{,}0$ und $e = 100{,}5$.

Dem gegenüber war e vor der Regulierung = 100,8, hat also nur um 0,3% abgenommen. Behielte e genau denselben Wert wie früher, so müßte sich nach Grundgesetz II infolge der Verminderung von N um 4,9% die Tourenzahl um genau eben so viel erhöhen. Da aber der Anker in Wirklichkeit nur den um 0,3% geringeren Wert von e zu entwickeln hat, so wird er nicht um 4,9%, sondern nur um 4,6% schneller laufen. Durch die gewählte Verminderung der Feldstärke ist also eine völlige Nachregulierung noch nicht erreicht worden. Um die Tourenzahl um 4,9% zu heben, muß man N noch um 0,3% mehr, also im ganzen um 5,2% herabdrücken.

Als Schlußresultat dieser Betrachtungen ergibt sich also, daß man den Tourenabfall, welcher zwischen Leerlauf und Vollbelastung des Motors eintritt, in der Tat durch eine Verringerung der Felderregung wieder ausgleichen kann. Soll die Nachregulierung

Digitized by Google

vollkommen sein, so muß die Polstärke prozentisch um etwas mehr verkleinert werden, als der Tourenabfall betrug.

Die Verminderung von N geschieht natürlich durch eine entsprechende Änderung des Erregerstromes, welche aus der Magnetisierungskurve des Maschinengestelles (Fig. 13) zu entnehmen ist. Praktisch erreicht man die Verkleinerung der Polstärke durch Einschaltung von regulierbaren Kurbelwiderständen zwischen Stromzuführung und Erregerwickelung (zwischen A und D in Fig. 28). Diese Widerstände, welche wie die Erregerwickelung selbst aus dünnem Draht hergestellt werden können, werden gewöhnlich mit dem Anlaßwiderstand des Ankers in einem Kasten vereint. Der letztere birgt meist noch einen dritten Widerstand, welcher folgenden Zweck hat:

Beim Unterbrechen des Erregerstromes wird, wie bereits auf S. 29 erörtert wurde, die ganze potentielle Energie der Magnetisierung auf die Magnetwickelung in Gestalt eines Stromstoßes übertragen, welcher einen sehr starken Öffnungsfunken hervorbringt und auch, die Isolation durchschlagend, von einer Wickelungsschicht zur anderen überspringen kann. Um dies zu vermeiden, drückt man die Magnetisierung vor dem Öffnen des Erregerstromes erst langsam herab, indem man den Strom stufenweise durch eingeschaltete Widerstände (Öffnungswiderstände) verkleinert. Die Energie, welche dann beim Übergang von einer Stufe zur anderen frei wird, kann Zerstörungen nicht mehr anrichten. Nebenbei möge hier bemerkt werden, daß beim Abstellen eines Motors stets zuerst die zum Anker führende Leitung und dann erst die mit der Erregerwickelung verbundene geöffnet werden muß, denn im umgekehrten Falle würde mit dem Magnetfeld auch die E.M. Gegenkraft aufhören und der Anker zu viel Strom erhalten. Beim Anlassen muß zuerst die Felderregung und dann erst der Anker eingeschaltet werden.

Anlaß- und Regulierwiderstand werden heutzutage gewöhnlich in der durch Fig. 29 dargestellten Weise kombiniert, so daß ihre Kontakte von ein- und derselben Kurbel bestrichen werden können. In dieser Figur sind in zwei konzentrischen Kreisbögen 2 Reihen von Kontakten verschiedener Größe gezeichnet, welche bis auf das Stück a der inneren Reihe aus Metall, gewöhnlich aus Messing, hergestellt sind. Die Kontakte jeder Reihe sind durch Widerstände mit einander verbunden, und zwar bei der inneren Reihe durch die vor den Anker zu schaltenden Anlaßwiderstände, bei der äußeren

Digitized by Google

rechts durch die Regulierwiderstände und links durch die „Öffnungswiderstände", welche der Erregerwickelung vorzuschalten sind. Soll diese Vorrichtung bei dem in Fig. 28 gezeichneten Motor benutzt werden, so sind die Verbindungen $A\,D$ und $B\,C$ zu lösen, und statt dessen sind die Punkte A oder B in Fig. 28 mit A, B in Fig. 29, und ferner die Punkte C und D der einen Figur mit den gleich bezeichneten der andern zu verbinden.

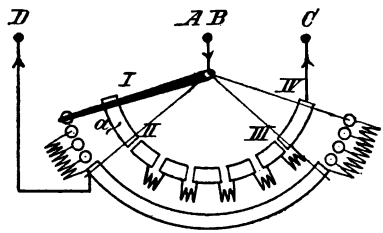


Fig. 29.

Solange sich die metallische Kurbel in der Stellung I befindet, liegt sie im inneren Kreise auf Stück a, das aus Isolationsmaterial besteht, und im äusseren auf einem Leerkontakt; sowohl der Ankerstrom wie auch der Erregerstrom sind also unterbrochen. Wird die Kurbel in die Lage II gebracht, so liegt sie innen noch auf Isolation, außen auf dem langen Mittelkontakt. Nach C, d. h. zum Anker hin, besteht also noch keine Verbindung; dagegen kann der Strom, der über A, B in die Kurbel eintritt, von dem Mittelkontakt der äußeren Reihe nach D, von da in die Erregerwickelung und durch die obere Leitung (Fig. 28) zur Quelle zurück. In Zwischenstellungen zwischen I und II bestreicht die Kurbel die linken Kontakte der äußeren Reihe, und der Strom muß, bevor er D und die Erregerwickelung erreicht, noch die zwischen diesen Kontakten liegenden Offnungswiderstände durchfließen. Bei der Bewegung von I nach II wird also der Erregerstrom geschlossen und langsam auf seinen richtigen Wert gebracht. Dreht man die Kurbel weiter von II nach III, so ändert sich der Erregerstrom nicht, denn er fließt von jeder Stelle des äußeren Mittelkontaktes ohne merkliche Widerstandsvermehrung nach D. Gleichzeitig bestreicht die Kurbel auch die inneren Kontaktstücke. Indem sie das an äußerster Stelle links gelegene berührt, kann der Strom von der Kurbel aus durch die ganze Reihe der Anlaßwiderstände nach C und in den Anker, und

Digitized by Google

von dort über die obere Leitung (Fig. 28) zur Quelle zurückkehren. Je weiter sich die Kurbel dann der Stellung III nähert, desto weniger Anlaßwiderstände braucht der Strom zu durchfließen, um nach C zu gelangen. Bei Stellung III ist der Anlaßwiderstand ganz ausgeschaltet, und der Motor läuft mit voller Geschwindigkeit. Bei weiterer Drehung nach Stellung IV bleibt dem Ankerstrom der Weg über C direkt zum Anker, der Erregerstrom muß dagegen zunächst durch die Widerstände fließen, die rechts zwischen den Kontakten der äußeren Reihe liegen. Diese Widerstände dienen also zur Regulierung der Tourenzahl. Beim Abstellen des Motors wird die Kurbel wieder nach Stellung I zurückgedreht, und dabei werden zunächst der Ankerstrom und dann der Erregerstrom langsam vermindert und schließlich ausgeschaltet.

Die Regulierwiderstände für den Strom in den Magnetspulen sind bei diesen Anlassern gewöhnlich größer als zur Konstanthaltung der Drehungszahl notwendig ist und ermöglichen eine Tourenerhöhung von etwa 15%. Selbstverständlich kann man durch Vorschaltung besonderer noch größerer Widerstände vor die Erregerwickelung für specielle Betriebszwecke die Geschwindigkeit willkürlich in noch weiterem Umfange steigern. Da aber J_a zur Aufrechterhaltung gleicher Zugkraft in demselben Maße zunehmen muß, wie N vermindert wurde, so müssen in solchen Fällen Motoren mit entsprechend höherer Stromaufnahmefähigkeit, also größerer Normalleistung verwendet werden. Bei dieser Methode der Geschwindigkeitsvariierung hat also N bei kleinster Tourenzahl seinen höchsten Wert und J_a bei größter Tourenzahl, so daß in keinem Falle das Konstruktionsmaterial von Anker und Magnetgestell gleichzeitig vollkommen ausgenutzt wird. Der Wirkungsgrad ist aber von der Drehungszahl v so gut wie unabhängig, denn bei kleinem v, wo eine höhere Stromstärke J_n in der Schenkelwickelung zur Magnetisierung aufzuwenden ist, wird der Verlust $E_p J_n$ in dieser Wickelung größer, während bei großem v der Ankerverlust $J_a^2 w_a$ höhere Werte annimmt. Beides gleicht sich ungefähr aus, da beide Verluste für mittlere Belastung von gleicher Größenordnung sind. Eine weitere Eigenschaft dieses Regulierverfahrens ist, daß die einmal eingestellte Tourenzahl — wie immer beim einfachen Nebenschlußmotor — von der Belastung unabhängig bleibt.

Um die mangelhafte Ausnutzung des Konstruktionsmaterials zu vermeiden, hat man versucht, die Vergrößerung der Tourenzahl, statt

Digitized by Google

durch eine Verkleinerung der Polstärke N, durch eine Verminderung der Ankerwindungszahl n zu erreichen, was nach Grundgesetz II möglich sein muß. Will man z. B. die Tourenzahl auf das Doppelte erhöhen, so braucht man die Hälfte der Ankerwindungen nicht völlig abzuschalten, sondern kann sie so wieder zuschalten, daß je zwei bei einander liegende Windungen, die früher „hinter einander", d. h. so geschaltet waren, daß sie nach einander von demselben Strome durchflossen wurden, jetzt „parallel", d. h. so geschaltet werden, daß der Strom, der sie durchfließen will, sich in zwei gleiche Teile verzweigen muß. Jetzt nimmt der Anker den doppelten Strom auf, jede Windung führt aber denselben Strom wie früher, um dasselbe Drehmoment nach Grundgesetz III auszuüben. Nach der Umschaltung wirken je zwei parallel geschaltete Windungen wie eine einzige von doppelter Dicke. Für die Induktion der elektromotorischen Gegenkraft ist also nur die halbe Windungszahl vorhanden, und der Anker muß doppelt so schnell laufen. Doppelte Tourenzahl bei gleichem Drehmoment entspricht aber doppelter Leistung. Bei diesem Verfahren würde also sowohl die Stromaufnahmefähigkeit der einzelnen Ankerdrähte, wie auch die Magnetisierbarkeit des Magnetgestelles bei allen Tourenzahlen in gleicher Weise ausgenutzt. Praktisch kann man die Methode dadurch vereinfachen, daß man nicht je zwei einzelne Windungen, sondern ganze Gruppen umschaltet. Trotzdem führt die Umschaltung am laufenden Anker zu komplizierten Konstruktionen, welche nur wenige Tourenstufen einzurichten gestatten. Aus diesem Grunde wohl hat sich dieses Verfahren bisher nur wenig verbreitet.

Auch eine Herabdrückung der Drehungszahl ist beim Nebenschlußmotor mit den einfachsten Mitteln möglich. Man braucht nur dem Anker einen entsprechenden Widerstand ϱ dauernd vorzuschalten. Grundgesetz I kommt dadurch auf die Form:

$$E_p = J_a (w_a + \varrho) + e,$$

d. h. der Motor hat nur eine geringere elektromotorische Gegenkraft zu entwickeln, und seine Tourenzahl muß abnehmen. In demselben Maße wie $J(w_a + \varrho)$ gegenüber e künstlich vergrößert wird, nimmt aber auch in der Bilanzgleichung

$$E_p J_a = J_a^2 (w_a + \varrho) + e J_a$$

der Verlust $J_a^2 (w_a + \varrho)$ gegenüber der Leistung $e J_a$ zu, welche in mechanische umgesetzt wird. Der Wirkungsgrad des ganzen Motors geht also in demselben Maße herab, wie die Tourenzahl. Ein zweiter Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, daß durch die Hinzufügung von ϱ die Tourenschwankungen vergrößert werden, welche bei be-

Digitized by Google

stimmten Schwankungen der Belastung auftreten. In der Tat hat eine Änderung von J_a eine um so größere Änderung von e, also auch von v zur Folge, je größer $(w_a + \varrho)$ ist.

An Stelle von ϱ kann man bei dem genannten Verfahren auch den Anlaßwiderstand des Motors benutzen, da dieser ebenfalls dem Anker vorgeschaltet ist. Die gewöhnlichen Anlasser sind indes nur für die kurze Einschaltdauer während des Anlaufsvorganges dimensioniert und können den Ankerstrom ohne zu starke Erhitzung nicht dauernd ertragen; sie müssen also für Tourenregulierung besonders eingerichtet werden.

Größere Motoren pflegt man häufig, sehr große Motoren stets mit „Flüssigkeitswiderständen" anzulassen, weil Drahtanlasser zu große Dimensionen erhalten müßten. Ein Flüssigkeitswiderstand besteht aus einem Wasserbade, welches durch Auflösung von Pottasche oder Soda leitend gemacht ist und welchem der Strom durch je eine eintauchende Blechplatte zu- und abgeleitet wird. Im einzelnen in der Konstruktion verschieden, werden diese Widerstände alle dadurch regulierbar gemacht, daß man die Blechplatten mehr oder weniger tief eintaucht und daher dem Strom in der Flüssigkeit einen mehr oder weniger großen Querschnitt bietet. Solche Anlaßwiderstände werden zwischen B und C (Fig. 28) statt der direkten Verbindungsleitung vor den Anker geschaltet. Zwischen A und D kommt wie gewöhnlich der Tourenregulierwiderstand, welcher hier gleichzeitig als „Öffnungswiderstand" benutzt werden kann. Für besondere Zwecke, wo automatisches Anlassen notwendig ist, wie z. B. bei Aufzügen, sind besondere Anlasser konstruiert worden, bei denen der Anlaßwiderstand durch irgend eine von dem Aufzugswärter ausgelöste äußere Kraft automatisch ausgeschaltet wird. Für die Ausführung dieses Prinzips gibt es viele Möglichkeiten. Die Firma Schuckert verwendet u. a. einen Hilfsmotor, Siemens & Halske benutzen einen Zentrifugalregulator, und bei den Anlassern der A.E.-G. wird durch einen Zug am Steuerseil eine durch ein Gesperre gehaltene Bürste freigegeben, welche, durch eine Ankerhemmung zurückgehalten, an der vertikal gestellten Kontaktreihe der Anlaßwiderstände langsam heruntergleitet. Auch für automatische Tourenregulierung sind zahlreiche Konstruktionen vorhanden, bei denen der Reguliehebel durch eine von der vorhandenen Tourenzahl abhängige Kraft automatisch gedreht wird.

Digitized by Google

Einen Nebenschlußmotor von der in Fig. 28 dargestellten Schaltung kann man ohne weiteres auch als Generator benutzen, indem man die Erregerwickelung nach wie vor von einer besonderen Stromquelle aus speist und den Anker, wie beim Magnetgenerator, künstlich durch eine Kraftmaschine dreht. Die auf S. 63 dargestellten Gesetze des Magnetgenerators gelten hier unverändert ebenfalls.

Bekanntlich ist aber die Erregung des Generators durch eine äußere Quelle nicht notwendig, denn die modernen Gleichstrommaschinen erregen sich selbst. Die Betrachtung dieses Vorganges geschieht am einfachsten an der Hand von Fig. 30a, in welcher die Schaltung der Fig. 28 mit der einzigen Abweichung schematisch wiederholt ist, daß die Erregerwickelung nicht wie früher an die Zuleitungen von der Stromquelle, sondern an die Ankerklemmen angeschlossen ist.

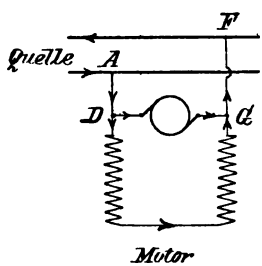


Fig. 30a.

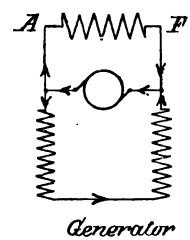


Fig. 30b.

Der Übergang vom Motor zum Generator ergibt sich, wenn man die Verbindungen mit der Stromquelle bei A und F (Fig. 30a) löst und zwischen A und F (Fig. 30b) einen Widerstand schaltet. Soll die Maschine bei künstlicher Drehung im Sinne der früheren Drehung des Motors jetzt Strom in diesen Widerstand liefern, so müssen offenbar zwei Bedingungen erfüllt sein. Erstens muß von der Magnetisierung der Motorpole bei der Umschaltung so viel zurückbleiben, daß bei der künstlichen Drehung im Anker noch eine merkliche E.M.K. induziert wird. Der dadurch im Anker erzeugte Strom verzweigt sich dann nach Fig. 30b in die Erregerwickelung und in den äußeren Widerstand. Zweitens muß aber der nunmehr in die Erregerwickelung hineingeschickte Strom die alte Magnetisierung unterstützen und erhöhen.

Die erste Bedingung erfüllt sich durch die Erscheinung des

Digitized by Google

„remanenten“ Magnetismus, welche darin besteht, daß ein magnetisiertes Eisenstück seinen Magnetismus nie völlig wieder verliert, wenn die erregende Kraft aufhört. Die Ausnutzung dieses Phänomens zur Selbsterregung der Generatoren ist bekanntlich eine der Großtaten von Werner Siemens, welcher diesen Gedanken als „dynamoelektrisches Prinzip“ im Jahre 1867 der Berliner Akademie der Wissenschaften vortrug. Die zweite Bedingung ist zunächst eine solche der Schaltung, d. h. des richtigen Anschlusses der Erregerwickelung an den Anker. Die Verbindung beider muß offenbar so geschehen, daß der Erregerstrom Kraftlinien von derselben Richtung wie die remanenten in den Magnetschenkeln erzeugt; der Magnetismus und der von ihm induzierte Strom erhöhen dann gegenseitig ihre Stärke bis zu einem Gleichgewichtszustande.

Um den Vorgang der Selbsterregung näher zu studieren, betrachten wir die Fig. 30b und nehmen an, daß der äußere Widerstand $\overline{AF}$ offen sei, also der ganze Ankerstrom zur Erregung verwendet werde. In diesem offenen Zustande werden die Nebenschluß-Maschinen in der Tat bei der praktischen Verwendung erst auf Spannung gebracht, ehe sie durch Anschluß an ihr Leitungsnetz belastet werden. Zur weiteren Vereinfachung der Betrachtungen soll angenommen werden, daß beim Anlauf auch die Erregerwickelung noch nicht mit dem Anker verbunden sei und erst angeschlossen werde, wenn die Maschine schon auf ihre normale Tourenzahl v gebracht ist.

Würde man auf Selbsterregung verzichten und von einer äußeren Quelle Strom in die Erregerwickelung schicken, so würde mit wachsender Erregerstromstärke die Polstärke N und damit auch die E.M.K. $e = N \cdot n \cdot v$ nach der Kurve $\overline{BA}$ (Fig. 30c) steigen, wenn zu Beginn die remanente Magnetisierung $\overline{OB}$ wäre.

Der Kurve $\overline{BA}$ folgt nun N auch bei Selbsterregung in folgender Weise: Die E.M.K. $e = \overline{OB}$, welche der remanente Magnetismus induziert, erzeugt in der Erregerwickelung einen Strom e/w, wenn w der Gesamtwiderstand aus Anker und Erregerwickelung ist. Dieser Strom möge dargestellt sein durch $\overline{OC}$; dann ist also $\operatorname{tg} \overline{BCO} = \operatorname{tg} \alpha = w$. Nach der Magnetisierungskurve erzeugt dieser Strom die E.M.K. $\overline{CD'}$, welche gleich $\overline{OB'}$ ist, wenn man $\overline{D'B'} \parallel \overline{CO}$ zieht. Diese Vergrößerung der E.M.K. von $\overline{OB}$ auf $\overline{OB'}$ hat aber auch eine Vergrößerung der Stromstärke in gleichem Verhältnis zur Folge; man erhält den neuen Erregerstrom also in Gestalt von $\overline{OC'}$, indem man $\overline{B'C'} \parallel \overline{BC}$ zieht. Die neue Stromstärke $\overline{OC}$ erzeugt jetzt aber eine E.M.K. $\overline{C'D''} = \overline{OB''}$, welche wiederum eine Steigerung des Erregerstromes auf $\overline{OC''}$ zur Folge hat, wenn $\overline{B''C''} \parallel \overline{B'C'}$ gezogen wird . . . Man erkennt deutlich, daß die Erregerstromstärke,

Digitized by Google

welche durch eine induzierte E.M.K. hervorgerufen wird, ihrerseits eine noch größere E.M.K. schafft, daß sich also Erregerstrom und E.M.K. allmählich, aber immer langsamer steigern, und daß schließlich ein Grenzwert erreicht wird, der bei derjenigen Stromstärke liegt, welche eine E.M.K. erzeugt, die ihrerseits gerade wieder dieselbe Stromstärke herstellt. In Fig. 30d ist dieser Grenzfall gezeichnet: Die E.M.K. $\overline{Ob}$ erzeugt den Strom $\overline{Oc}$, und dieser wiederum die E.M.K. $\overline{cd} = \overline{Ob}$; auch in dieser Figur muß natürlich wieder $\operatorname{tg}(b\,c\,O) = \operatorname{tg}\alpha = w$ sein. Den Grenzpunkt d, bis zu welchem die Selbsterregung ansteigt, kann man leicht direkt gewinnen, wenn man bedenkt, daß auch $\measuredangle (d\,O\,c) = \alpha$ ist. Man braucht zur Bestimmung von d nur an die Abszisse, unter $\measuredangle \alpha = arctg\, w$ geneigt, eine

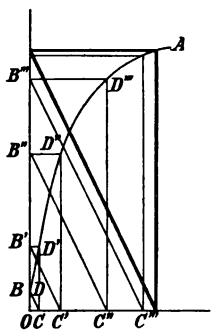


Fig. 30c.

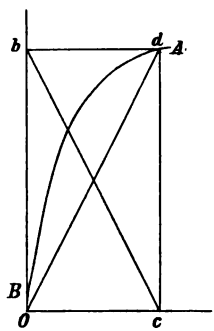


Fig. 30d.

Gerade anzutragen und erhält als deren Schnittpunkt mit der Magnetisierungskurve den gesuchten Punkt d. Selbstverständlich läßt sich durch Änderung von w, also durch Hinzufügung eines Regulierwiderstandes zur Erregerwickelung, die Lage von d, also auch die E.M.K. verändern, welche die sich selbst erregende Maschine in ihrem Anker erzeugt.

Wenn also die Aufgabe gestellt wird, einen Nebenschlußmotor zu einem Nebenschluß-Generator herzurichten, so muß noch die Frage beantwortet werden, ob der Sinn des Stromflusses in der Erregerwickelung der richtige wird, wenn der Anschluß dieser Wickelung an den Anker derselbe bleibt, wie beim Motor, oder ob man etwa die angeschlossenen Enden mit einander vertauschen muß. Dabei möge vorausgesetzt werden, daß der Anker bei beiden Betriebsarten denselben Drehungssinn behalte. Da in diesem Falle im Anker des Generators ein Strom vom entgegengesetzten Sinne induziert wird, als er in den Motoranker hineingeschickt werden mußte, so fließt der Ankerstrom in Fig. 30b von rechts nach links,

Digitized by Google

während er in Fig. 30a von links nach rechts fließt. Die Stromrichtung in der Erregerwickelung ergibt sich nun bei beiden aus Folgendem: Beim Motor verzweigt sich der von außen (A) zugeführte Strom als Hauptstrom in Anker und Erregerstrom; beim Generator dagegen ist der Ankerstrom der Hauptstrom, weil der Anker die Stromquelle bildet, und der Erregerstrom und der nach außen geführte sind seine Zweigströme. Hält man dies fest und zugleich die obige Bemerkung über die Verschiedenheit der Stromrichtung im Anker von Motor und Generator, so erkennt man aus Fig. 30a und b leicht, daß der Strom in der Erregerwickelung bei beiden im gleichen Sinne, in den nach außen führenden Leitungen aber im umgekehrten Sinne fließen muß. Mit der gleichen Richtung des Magnetisierungsstromes ist aber auch die zweite Bedingung für die Selbsterregung erfüllt, und es gilt der Satz, daß eine Nebenschlußmaschine, welche als Motor gelaufen ist, in gleichem Sinne durch äußere Kraft gedreht, sofort auch als Dynamo benutzt werden kann und dann Strom von entgegengesetzter Richtung nach außen liefert, als ihr vorher von außen zugeführt werden mußte.

Selbstverständlich kann eine Nebenschlußmaschine danach auch ohne Zusammenhang mit ihren Eigenschaften als Motor jederzeit als selbständige Stromquelle benutzt werden, wenn die Feldmagnete nur ein einziges Mal in passender Weise durch eine äußere Stromquelle erregt worden sind. Diese Umkehrbarkeit hat auch für die reine Motorentechnik hervorragendes Interesse, weil daraus die Möglichkeit der Kraftrückgabe und andere Betriebsvorteile gewonnen werden können, auf die im Abschnitt IX zurückzukommen ist. Im folgenden sollen deshalb die Eigenschaften der Nebenschluß-Dynamos kurz besprochen werden.

Wird ein Generator nicht durch sich selbst, sondern von außen her durch einen besonderen Strom erregt, so ist seine Spannungscharakteristik natürlich gleich derjenigen der Magnetmaschine von derselben Polstärke N; die induzierte E.M.K. e ist also, wie N, konstant, und die Spannung E_p an den Bürsten nimmt wegen des im Anker auftretenden Spannungsabfalles linear ab (Fig. 27b S. 62). Die Nebenschluß-Dynamo aber unterscheidet sich von dem Magnetgenerator dadurch, daß bei ihr N nicht konstant, sondern von der Ankerspannung E_p abhängig ist. Da die Erregerwickelung direkt an die Ankerklemmen angeschlossen ist, so ist E_p auch die Spannung, welche der Erregerwickelung zur Verfügung steht, und der Strom in

Digitized by Google

der letzteren wird, wenn ihr Widerstand w_n ist,

$$J_n = \frac{E_p}{w_n}.$$

Mit E_p wird also bei einem Nebenschluß-Generator auch die Magnetisierung der Feldmagnete geringer, und daher muß auch e, die induzierte E.M.K., mit wachsender Stromentnahme abnehmen. Zu dieser Abnahme von e kommt aber auch hier natürlich noch der Spannungsabfall im Anker hinzu, so daß E_p aus doppeltem Grunde mit zunehmender Stromstärke sich vermindert und infolgedessen schneller als linear abnimmt[1]). Bei modernen Maschinen ist E_p bei voller Belastung etwa um 8—12 % geringer als bei Leerlauf, d. h. als wenn nach außen kein Strom entnommen und der ganze Ankerstrom in die Erregerwickelung der Magnetschenkel geschickt wird.

Die Theorie der Nebenschluß-Dynamo gibt aber ein einfaches Mittel, auch diesen Spannungsabfall durch Nachregulieren noch zu beseitigen. Wenn man nämlich in den Weg des Erregerstromes einen Regulierwiderstand einschaltet, welcher mit wachsender Belastung der Maschine immer mehr verkleinert wird, so kann man dadurch den Erregerstrom nicht nur auf konstanter Höhe erhalten, so daß e konstant bleibt, sondern sogar so weit vergrößern, daß e steigt, der Spannungsabfall im Anker dadurch gedeckt wird und E_p unveränderlich bleibt.

Die Verwendung eines solchen Nebenschlußregulators bildet das übliche Regulierverfahren für alle Betriebe mit „Parallelschaltung", bei denen ein Leiterpaar oder ein ganzes Verteilungsnetz unter konstanter Spannung gehalten und die Konsumstellen einzeln daran angeschlossen werden (S. 57). Da diese Stromverteilung die übliche ist, so hat die Nebenschlußmaschine von allen Gleichstromquellen die größte Bedeutung gewonnen.

[1]) Dazu kommen noch, in demselben Sinne wirkend, der Einfluß der sogenannten Ankerrückwirkung, auf welche im Abschnitt XI eingegangen werden wird, und andere sekundäre Erscheinungen.

Digitized by Google

VII. Hauptstrom-Motor und Hauptstrom-Generator.

Die im vorangehenden Abschnitt besprochene Erregungsart des Motors wird dadurch charakterisiert, daß außer dem Ankerstrom der Quelle noch ein „Nebenschluß"strom entnommen und den Schenkelwickelungen zugeführt wird. Statt eines solchen Zweigstromes kann man natürlich auch den Ankerstrom selbst zur Erregung verwerten,

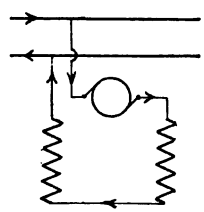


Fig. 31a.

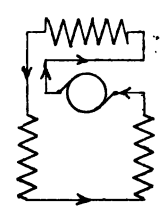


Fig. 31b.

indem man ihn vor oder nach dem Durchfließen des Ankers durch die Schenkelwickelung strömen läßt. Ein so geschalteter Motor wird in Fig. 31a schematisch dargestellt und heißt Hauptstrom- oder Serien-Motor. Für ihn ergeben sich folgende Betriebseigenschaften:

Anlauf.

Bei dem Magnetmotor ist nachgewiesen worden, daß jeder Motoranker beim Anlaufen unter konstanter Spannung sehr starke Ströme aufnimmt, wenn diese nicht durch Anlaßwiderstände herabgedrückt werden. Das Drehmoment, welches nach Grundgesetz III des Elektromotors proportional dem Ankerstrom J wächst, wird bei Hauptstrommotoren ganz besonders groß, weil die beim Anlauf auf-

Digitized by Google

tretenden starken Ankerströme auch die Magnetschenkel umfließen und auch die Polstärke N, also den zweiten für die Größe des Drehmoments entscheidenden Faktor, sehr hoch treiben. Der Hauptstrommotor hat also die Tendenz, mit ganz besonders großer Zugkraft anzulaufen.

Wie beim Magnetmotor und beim Nebenschlußmotor, so kann allerdings auch beim Hauptstrommotor in der Regel nicht die volle Zugkraft zum Anlauf ausgenutzt werden, welche er herstellen könnte, wenn er ohne Vorschaltwiderstand an die volle Betriebsspannung angeschlossen würde. Aus den früher angegebenen Gründen würde der Strom auch bei diesem Motortypus zu groß werden. Nur kleine Ventilator-Motoren pflegt man ohne Anlaßwiderstand direkt an das Netz zu legen.

Trotz dieser Beschränkung sind die Hauptstrom-Motoren den anderen Typen gegenüber in Bezug auf ihr Anlaufsmoment wesentlich überlegen. Für die kurze Zeit des Anlaufs kann man eine beträchtlich größere Stromstärke zulassen als für den Dauerbetrieb, und so kann auch die Polstärke vorübergehend sehr gesteigert werden. Denselben Grad der magnetischen Sättigung wie bei Anlauf der Hauptstrommotoren könnte man allerdings auch bei Nebenschlußmotoren erreichen, wenn man die Schenkelwickelung danach einrichtete. Da aber beim Nebenschluß-Typus die Erregerwickelung für sich allein an das Stromverteilungsnetz angeschlossen wird, und der Erregerstrom mit dem Ankerstrome in keinem Zusammenhange steht, so müßte diese Wickelung von vornherein so dimensioniert werden, daß sie eine hohe Ampèrewindungszahl liefern könnte. Dies wäre nur möglich unter Anwendung von verhältnismäßig vielem Draht und vielem Strom. Die Dimensionen solcher Nebenschlußmotoren würden also groß, und die speziell für den Anlauf geschaffenen Verhältnisse wären für den Dauerbetrieb nicht günstig. Wollte man den laufenden Motor mit dem beim Anlauf benutzten Sättigungsgrad dauernd arbeiten lassen, so verbrauchte die Erregung unverhältnismäßig viel Energie, denn hohe Sättigungsgrade lassen sich wegen des langsamen Steigens der Magnetisierungskurve in diesem Bereiche nur unter Aufwand von vielen Ampèrewindungen herstellen. Nicht zweckmäßiger aber wäre es, den Erregerstrom des Anlaufs im Betriebe durch Widerstände herabzudrücken, da dann das Konstruktionsmaterial vollends nicht ausgenützt würde. Beim Hauptstrom-Motor dagegen schafft der hohe Ankerstrom, indem er auch die Schenkel umfließt,

Digitized by Google

die günstigen Anlaufsverhältnisse vorübergehend ganz von selbst, ohne daß die für den Betrieb bestimmte Dimensionierung deshalb verändert zu werden brauchte. Für den modernen Serienmotor liegen die Verhältnisse etwa so, daß er bei vorübergehender anderthalbfacher Stromaufnahme ungefähr das Doppelte der normalen Zugkraft zu entwickeln vermag, während beim Nebenschluß-Motor nach den früheren Betrachtungen die Zugkraft nur in demselben Maße zunimmt wie der Strom.

Strom- und Energieaufnahme des laufenden Motors.

Aus der Bilanzgl. (33) für den laufenden Nebenschluß-Motor ergibt sich ohne weiteres die entsprechende für den Hauptstrom-Motor, wenn man den Effektverlust in der Nebenschlußwickelung $E_p J_n$ ersetzt durch denjenigen in der Hauptstromwickelung. Ist der Widerstand der letzteren w_h, so ist die von ihr sekundlich verzehrte Energie $J^2 w_h$, und die Bilanzgleichung des Hauptstrom-Motors wird

$$A = E_p J = J^2 w_a + J^2 w_h + L + A_n.$$

Diese Substitution ist nicht ohne Bedeutung für die Ökonomie des Betriebes, denn $E_p J_n$ bildet einen von der Belastung des Motors unabhängigen Verlust, während $J^2 w_h$ mit der Stromaufnahme, also mit der Leistung des Motors zunimmt. Für kleinere Belastungen müßte also der Wirkungsgrad des Hauptstrom-Motors relativ günstiger sein als der des Nebenschluß-Motors. Diese Erscheinung wird aber verdeckt durch die Veränderlichkeit der mechanischen Arbeitsverluste des ersteren mit der Leistung, welche in der großen Veränderlichkeit der Tourenzahl ihren Grund hat.

Die Tourenzahl und ihre Regulierung.

Die Abhängigkeit der Tourenzahl von der Stromaufnahme des Motors ergibt sich aus der als erstes Grundgesetz festgelegten Bedingungsgleichung für die E.M. Gegenkraft einerseits und der Magnetisierungskurve des Motors andererseits.

Setzt man den Gesamtwiderstand des Hauptstrom-Motors

$$w_a + w_h = w_m,$$

so wird das erste Grundgesetz

$$E_p = J w_m + e$$

Digitized by Google

oder

$$e = E_p - J w_m,$$

d. h. bei Betrieb mit konstanter Spannung E_p, der wieder vorausgesetzt werden soll, muß der Motor sich so einlaufen, daß e mit wachsender Stromaufnahme linear abnimmt. Die dazu nach Grundgesetz II notwendige Tourenzahl v ändert sich aber mit der Stromstärke sehr beträchtlich, da hier die Polstärke N nicht mehr konstant, sondern mit J in den weitesten Grenzen variabel ist. Man erkennt den Zusammenhang von v und J sofort, wenn man sich die Gestalt der Magnetisierungskurve des Motors vergegenwärtigt, deren typisches Bild in Fig. 13 S. 35 dargestellt ist. Fig. 13 gibt die Abhängigkeit der Polstärke N eines Maschinengestelles von der Ampèrewindungszahl auf den Schenkeln wieder. Wenn die Windungszahl der Erregerwickelung konstant bleibt, stellt diese Kurve bis auf den Maßstab auch den Zusammenhang zwischen N und dem Schenkel- oder Ankerstrom dar. Die Gestalt dieser Magnetisierungskurve möge angegeben werden durch die Funktion

$$N = f(J), \quad \ldots\ldots\ldots \quad \text{(IV)}$$

welche als die vierte Grundgleichung des Hauptstrom-Motors betrachtet werden kann. Da aber diese Funktion mathematisch nicht ausdrückbar ist, müssen alle Schlußfolgerungen aus ihrer Eigenart an der Hand der Fig. 13 gezogen werden.

Um bei zunehmender Stromstärke eine linear abnehmende elektromotorische Gegenkraft e entwickeln zu können, muß der Motor nach Grundgesetz II sich so einlaufen, daß das Produkt Nv ebenfalls linear abnimmt. Trägt man Nv statt e in Funktion von J als eine abfallende Gerade auf (Fig. 32) und in dasselbe Koordinatensystem auch die Werte von N als Funktion von J nach Fig. 13, so kann man für jeden Wert von J sofort den entsprechenden Wert von Nv und von N übersehen und daraus v ableiten. Betrachtet man z. B. den Wert $J = \overline{OA}$, so ist hierfür $Nv = \overline{AB}$ und $N = \overline{AB'}$, also $v = \overline{AB} : \overline{AB'}$, d. h. der Quotient aus den Ordinaten beider Kurven gibt den direkten Maßstab für die Tourenzahl.

Danach muß v bei sehr großen Stromaufnahmen des Motors sehr gering, bei kleinen aber sehr groß werden und im ganzen sich nach der mit negativen Ordinaten aufgetragenen hyperbelartigen Kurve v (Fig. 32) verändern. Sachlich bedeutet dies, daß der Motor bei großen Stromaufnahmen und Leistungen eine so starke

Digitized by Google

Magnetisierung erfährt, daß der Anker nur wenige Touren zu machen braucht, um die vorgeschriebene E.M.K. zu entwickeln, während bei kleinen Stromstärken die Polstärke nur so gering wird, daß es sehr großer Geschwindigkeit des Ankers bedarf, um jene Werte von e zu erzeugen. Als Ergebnis dieser Betrachtung kann also festgestellt werden, daß ein Hauptstrom-Motor, mit konstanter Spannung gespeist, bei großen Belastungen langsam läuft, bei kleinen dagegen die Tendenz hat, durchzugehen. Die Kurve v pflegt als die Geschwindigkeitscharakteristik des Motors bezeichnet zu werden.

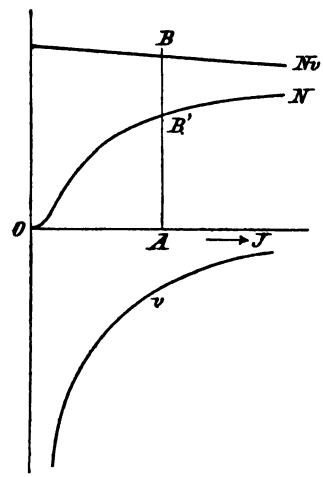


Fig. 32.

Als typisch für die Größe der Veränderung von v bei modernen Hauptstrom-Motoren können die folgenden Zahlen gelten:

Bei der 2,5 1,7 1 0,65 0,35 0,15fachen normalen Zugkraft erreicht v den 0,8 0,88 1 1,12 1,35 1,8 fachen normalen Wert.

Man kann die Drehungszahl des Motors freilich auch bei kleinen Leistungen wesentlich herabdrücken, indem man durch Vorschaltung eines Widerstandes vor denselben die zu entwickelnde E.M. Gegenkraft vermindert. Hat dieser Widerstand den Wert ϱ, so wird nach dem ersten Grundgesetze

$$e = E_p - J(w_m + \varrho).$$

Den Einfluß der Vorschaltung verschiedener Regulierwiderstände ϱ vor den Motor kann man am einfachsten überblicken, wenn man für

Digitized by Google

jedes ϱ die lineare Abnahme von e oder Nv mit wachsendem J einzeln graphisch darstellt (Fig. 33) und zu jeder solcher Geraden die zugehörige Geschwindigkeitscharakteristik zeichnet. Man erkennt leicht, daß durch passende Sprünge von einem Widerstand zum anderen — wie in Fig. 33 in den Kurven für v angedeutet — über den größten Teil des Belastungsbereiches des Motors eine annähernd konstante Tourenzahl erreicht werden kann.

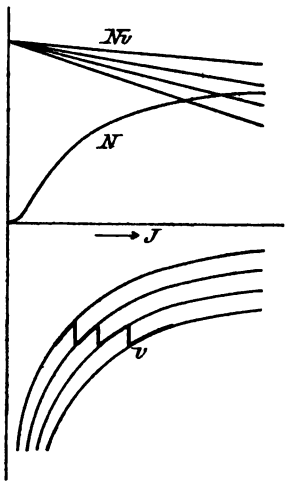


Fig. 33.

Das Durchgehen des Motors bei völliger Entlastung läßt sich allerdings auch durch die Vorschaltung sehr großer Widerstände ϱ nicht vermeiden, weil dabei wegen der geringen Stromaufnahme der Spannungsabfall $J(w_m + \varrho)$ doch nur gering wird und eine große E.M. Gegenkraft bei der von J erzeugten geringen Felderregung herzustellen übrig bleibt. Man soll daher Hauptstrom-Motoren nur in direkter und unlösbarer Kupplung mit denjenigen Maschinen benutzen, welche von ihnen angetrieben werden, und nur in solchen Fällen verwenden, wo selbst der Leerlauf dieser Maschinen noch keine völlige Entlastung des Motors bedeutet.

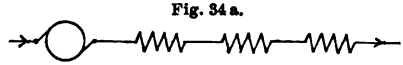
Bei der Erwähnung dieser Einschränkung in der Verwendbarkeit des Hauptstrommotors möge noch einmal auf den Vorzug seiner großen Anlaufszugkraft hingewiesen werden. Da der Widerstand ϱ dem ganzen Motor vorgeschaltet wird, so kann er gleichzeitig als Anlasser und Regulator benutzt werden, wenn er für dauernde Strom-

Digitized by Google

führung genügend dimensioniert wird. Die Steuerung des Motors kann also in denkbar einfachster Weise durch einen einzigen Hebel geschehen.

Die im vorangehenden geschilderte Reguliermethode hat den Übelstand, daß in den Vorschaltwiderständen ϱ sekundlich die elektrische Arbeit $J^2 \varrho$ Watt verloren geht und daher der Wirkungsgrad des Motors herabgedrückt wird. Um dies zu vermeiden, reguliert eine andere Methode die Tourenzahl dadurch, daß der Widerstand des Motors selbst verändert wird. Zu diesem Zwecke wird die Erregerwickelung aus mehreren Spulen zusammengesetzt, welche entweder „in Reihe" (Fig. 34a) geschaltet werden, d. h. so, daß der aus

Fig. 34a.



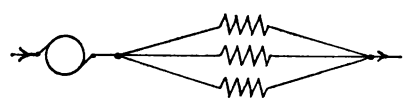


Fig. 34b.

dem Anker tretende Strom sie alle hintereinander durchfließt, oder „parallel" (Fig. 34b), d. h. so, daß der Ankerstrom nur Zweigströme in die Spulen sendet. Sind im ganzen m Spulen vorhanden und hat jede Spule n Windungen, so ist bei Reihenschaltung offenbar die gesamte auf die Magnete wirkende Ampèrewindungszahl $m\,n\,J$, bei Parallelschaltung dagegen, wo durch jede Spule nur der Strom $\frac{J}{m}$ fließt, beträgt diese Ampèrewindungszahl nur $m\,n\,\frac{J}{m} = n\,J$. Im ersteren Falle ist daher die pro Ampère Strom entwickelte Polstärke N größer als im letzteren, und daher liegt die Magnetisierungskurve $N = f_{(J)}$ höher. Bei der praktischen Verwertung dieser Reguliermethode pflegt man aber neben der reinen Reihen- und der reinen Parallelschaltung auch Zwischenschaltungen zu verwenden, bei denen die Spulen teilweise hintereinander und teilweise parallel geschaltet sind. Jede dieser Schaltungen weist dann eine besondere Magnetisierungskurve auf, die um so höher liegt, je mehr Spulen sich dabei „in Reihe" befinden. In Fig. 35 sind diese Charakteristiken für den Fall von 4 verschiedenen Kombinationen der Spulen dargestellt; bei starker Sättigung des Magnetgestelles nähern sich die verschiedenen Magnetisierungskurven einander natürlich wieder.

Digitized by Google

Mit den Schaltungen ändern sich andererseits auch die von dem Motor zu entwickelnden E.M. Gegenkräfte entsprechend Grundgesetz I, da sich der Widerstand w_m des Motors selbst ändert. Am größten ist dieser Widerstand offenbar bei Reihenschaltung, wo der ganze Strom alle Erregerwindungen einzeln durchfließen muß, am geringsten dagegen bei Parallelschaltung, da der Strom hier in den m Spulen m verschiedene neben einander liegende Wege findet. Jeder dieser Schaltungen entspricht also eine mit wachsender Stromstärke

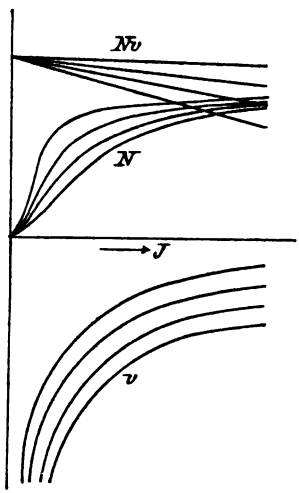


Fig. 35.

linear abnehmende E.M. Gegenkraft, und die Abnahme von e wird genau wie bei variabelen vorgeschalteten Widerständen durch je eine abfallende Gerade dargestellt. In Fig. 35 sind wiederum entsprechend Grundgesetz II die zu e gehörigen Kurven Nv gezeichnet. Dabei entspricht die am steilsten abfallende der reinen Reihenschaltung und die am wenigsten geneigte der reinen Parallelschaltung. Kombiniert man nun wieder die zusammengehörigen Geraden und Kurven zu je einer Geschwindigkeitscharakteristik v, so kommt man zu demselben Ergebnis wie bei der Regulierung durch Vorschaltwiderstände. Indem man bei geringster Belastung mit Reihenschaltung beginnt, kann man durch stufenweise fortschreitenden Übergang zur Parallelschaltung die Tourenzahl bei steigender Motorleistung annähernd konstant halten. Bleibt die Belastung während des Betriebes konstant, so wird man mit Reihenschaltung „anfahren“,

Digitized by Google

weil dabei die höchste Magnetisierung und daher die höchste Zugkraft auftritt, und zur Steigerung der Geschwindigkeit allmählich in die Parallelschaltung übergehen.

Konstruktiv wird die Umschaltvorrichtung gewöhnlich so ausgeführt, daß man die Magnetspulen in drei Gruppen teilt und deren Enden A und E (Fig. 36) zu 6 Kontaktstücken führt, welche isoliert vertikal über einander angebracht werden. Diesen gegenüber steht mit vertikaler Achse eine Walze aus isolierendem Material, welche durch eine Kurbel gegen die feststehenden 6 Kontaktstücke gedreht werden kann. Auf die Außenfläche dieser Walze werden andere passend gestaltete Kontaktstücke aufgesetzt, welche je nach

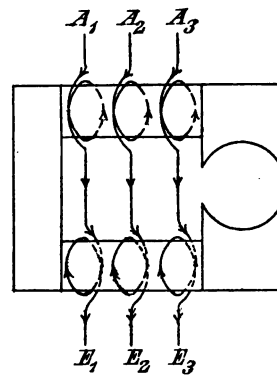


Fig. 36.

der Walzenstellung die Enden von A und E verschieden mit einander verbinden. Federnde Klinken sorgen dafür, daß die Walze nicht an falschen Zwischenschaltungen stehen bleiben kann.

Fig. 37a zeigt eine Abwickelung der Walzenoberfläche mit den Kontaktstücken nach der Einrichtung von Sprague, und daneben die Reihe von 8 festen Kontakten, von denen die oberen 6 an die Enden der drei Spulengruppen und die unteren beiden an die Bürsten des Ankers angeschlossen sind. Das oberste Kontaktstück ist außerdem mit der Stromzuleitung, das unterste mit der Rückleitung verbunden.

Durch diese Schalteinrichtung werden 7 verschiedene Verbindungen hergestellt, je nachdem die Vertikalen 1, 2, 3 . . . 7 vor der Mittellinie der rechts gezeichneten Kontakte stehen. Diese

Digitized by Google

Schaltungen sind in Fig. 37b der Reihe nach schematisch dargestellt. Es ist bei

Stellung	I	Spule 1, 2, 3 in Reihe
„	II	2, 3 in Reihe, 1 kurzgeschlossen
„	III	2, 3 in Reihe, 1 ausgeschaltet
„	IV	1, 2 parallel, 3 in Reihe
„	V	1, 2 parallel, 3 kurzgeschlossen
„	VI	1, 2 parallel, 3 ausgeschaltet
„	VII	1, 2, 3 parallel.

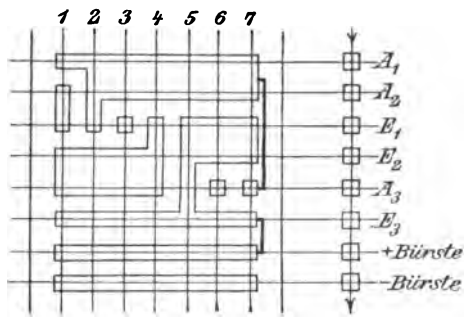


Fig. 37a.

Wie die vorangehende Beschreibung lehrt, steht dem Vorteil dieses Reguliersystems, daß Energieverluste außerhalb des Motors vermieden werden, der Nachteil gegenüber, daß von jedem feststehenden Kontakt des Schalters eine besondere Leitung zum Motor gezogen werden muß, die Installation daher umständlich und teuer wird. Für Betriebe, bei denen die Kosten der elektrischen Energie hinter andere Betriebskosten zurücktreten, wie öfters z. B. bei elektrischen Bahnen, kann die einfachere Reguliermethode durch vorgeschaltete Widerstände den Vorzug verdienen.

Neben den geschilderten werden noch andere Regulierverfahren benutzt, die aber nach dem Vorangehenden leicht zu verstehen sind. So kann man z. B. parallel der Erregerwickelung einen regulierbaren Zweigwiderstand schalten, welcher dieser Wickelung um so mehr Strom entführt, je geringer sein eigener Wert gemacht wird. Wie beim Nebenschlußmotor erhöht dann diese Verkleinerung des Erregerstromes die Tourenzahl.

Eine andere bei der gleichzeitigen Verwendung zweier Motoren

Digitized by Google

sehr brauchbare Reguliermethode besteht in einer Umschaltung der ganzen Motoren. Schließt man beide in Reihe an ein Netz von der Spannung E_p an, so daß derselbe Strom hintereinander durch beide Motoren fließt, so steht für jeden einzelnen die Spannung $\frac{E_p}{2}$ zur Verfügung, und jeder Motor läuft sich ein auf eine E.M. Gegenkraft

$$e = \frac{E_p}{2} - J w_m$$

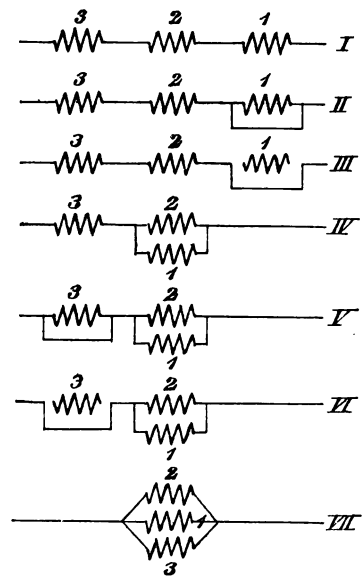


Fig. 37 b.

Schaltet man dagegen jeden einzeln an das Verteilungsnetz an, so wird

$$e = E_p - J w_m.$$

Ein Straßenbahnmotor z. B., welcher bei 500 Volt Spannung normal 25 Amp. aufnimmt und einen Widerstand $w_m = 2{,}5$ Ohm hat, entwickelt allein eine E.M. Gegenkraft $e = 500 - 62{,}5 = 437{,}5$ Volt, in Reihenschaltung mit einem gleichen Motor aber $e = 250 - 62{,}5 = 187{,}5$ Volt. Wie e, so ist also auch die Tourenzahl bei der Reihenschaltung weniger als halb so groß, wie bei der Parallelschaltung. Diese Methode wird bei elektrischen Bahnen vielfach

Digitized by Google

verwandt, um den Regulierbereich zu vergrößern. Jeder Motor wird dabei natürlich einzeln noch mit Regulierwiderständen versehen.

Alles Schalten an Hauptstrommotoren während des Betriebes ist wegen der starken Ströme, welche die Schaltvorrichtungen dabei durchfließen, gewöhnlich von kräftigen Funken begleitet. Diese oxydieren leicht die Kontakte oder schmelzen ihre Kanten ab. Zur Verhinderung dieses Schadens wird vielfach eine interessante magnetische Löschvorrichtung benutzt. Wenn man nämlich einen Magnetpol in die Nähe des Funkens bringt, so kann man zum Ausblasen des letzteren die elektromagnetische Kraft benutzen, welche er wie jedes Leiterstückchen im Felde des Magnetpoles erfährt. Wenn diese Kraft senkrecht zum Wege des Funkens wirkt, so stößt sie ihn aus seiner Bahn zwischen den Kontakten hinweg und bringt ihn so zum Erlöschen. Bilden in Fig. 37c z. B. *c c* die Kontakte, zwischen denen der Funke *ds* von links nach rechts überspringt, *N* und *S* die Pole, welche das vertikal von oben nach unten gehende Kraftfeld $\mathfrak{B}$ erzeugen, so wird der als Leiterelement zu betrachtende Funke *ds* nach der auf S. 40 angegebenen Fingerregel senkrecht zur Papierebene von dem Beschauer weggeblasen.

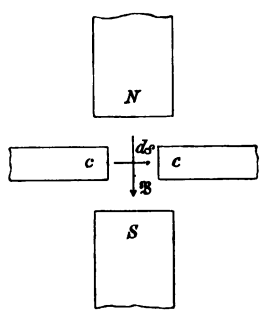


Fig. 37c.

Nachdem im Vorangehenden der Hauptstrommotor als solcher betrachtet worden ist, bleibt uns die Frage zu beantworten übrig, ob er auch, wie die Nebenschlußmotoren, durch äußere Kraft künstlich angetrieben, als selbsterregender Generator arbeiten kann. Offenbar ist dies nicht ohne weiteres der Fall, wenigstens nicht, wenn die Drehung des Generators im gleichen Sinne geschieht wie die des Motors. Man erkennt dies leicht, wenn man zunächst wieder Fig. 31a betrachtet und dann den Motor vom Netze abgeschaltet

Digitized by Google

und durch Widerstände geschlossen denkt (Fig. 31 b). Bei gleicher Drehrichtung entwickelt der Generator vermöge des remanenten Magnetismus wieder eine E.M.K. im Sinne der Gegenkraft des Motors und ergibt also einen Ankerstrom im umgekehrten Sinne, als ihn der Motor aufnahm. Da dieser Strom aber auch die Erregerwickelung durchfließt, so werden die Magnetschenkel sogleich entmagnetisiert und die Stromlieferung hört auf. Um den Hauptstrommotor zum Generator zu machen, muß man also, wenn die Drehrichtung dieselbe bleiben soll, die Erregerwickelung erst umschalten, d. h. ihre Anschlüsse mit einander vertauschen. Kann dagegen die Drehung umgekehrt geschehen, so liefert der Anker einen Strom von der

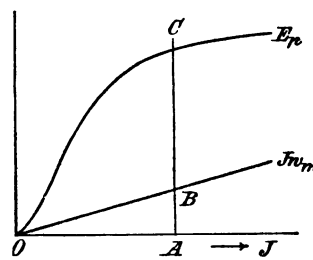


Fig. 88.

Richtung des Motorstromes, die alte Magnetisierung wird aufrecht erhalten, und es ist eine dauernde Stromlieferung ohne Umschaltung der Erregerwickelung möglich.

Die Abhängigkeit der E.M.K. des Hauptstrom-Generators von der Stromstärke, die er bei konstanter Tourenzahl liefert, ergibt sich unmittelbar aus der Magnetisierungskurve. Wenn $N = f_{(J)}$ bekannt ist, so folgt daraus $e = N n v$ als eine Kurve von gleichem Charakter wie die Kurve von N, da n und v konstant sind. Die E.M.K. des Serien-Generators nimmt also mit der Stromstärke erst schnell und dann langsam zu, ist aber weit davon entfernt, konstant zu sein.

Man kann diese Eigenschaft des Stromerzeugers zu einer besonders einfachen und interessanten Betriebsweise des Motors ausnutzen, bei welcher der letztere einer Vorrichtung zur Tourenregulierung ganz entbehren kann. Der Grundgedanke dieses Verfahrens besteht darin, daß dem Motor von einem ähnlich gebauten Generator aus nicht mehr konstante Spannung, sondern bei allen Stromstärken, die er aufnimmt, eine solche Spannung zugeführt

Digitized by Google

wird, daß er die ihm vorgeschriebene elektromotorische Gegenkraft bei konstanter Tourenzahl erzeugen kann.

Soll z. B. festgestellt werden, welcher Spannung ein Motor, dessen Magnetisierungskurve $N = f_{(J)}$ ist, bedarf, um bei allen Belastungen eine Tourenzahl v beizubehalten, so berechnet man zunächst e als Funktion von J nach Grundgesetz II und dann nach Grundgesetz I

$$E_p = J w_m + N n v.$$

In Fig. 38 ist für die Stromstärken $\overline{OA} = J$ zunächst $\overline{AB} = J w_m$ und dann von B aus $\overline{BC} = N n v$ aufgetragen und dadurch $AC = E_p$ gewonnen. Durch Wiederholung dieser Konstruktion für viele Werte von J erhält man die gezeichnete Form für die Kurve E_p. Diese Kurve ist ihrem Charakter nach die Spannungskurve eines Hauptstrom-Generators. Wenn es gelingt, einen solchen gerade mit dieser Spannungskurve zu bauen, so muß also offenbar der Motor mit ganz konstanter Tourenzahl laufen.

Die Anforderungen an die Einrichtung des Generators für den vorliegenden Zweck mögen unter der weiteren Annahme betrachtet werden, daß eine lange Fernleitung vom Widerstande w_l zwischen Motor und Generator liege und daß der Motor dennoch mit konstanter Tourenzahl laufen solle. Des Generators Widerstand sei w_g, und E sei seine E.M.K.; dann ist die Spannung an den Enden der Fernleitung, an die der Motor angeschlossen ist, da die Verluste $J w_g$ und $J w_l$ von E abgehen:

$$E_p = E - J w_g - J w_l$$

oder

$$E = E_p + J w_g + J w_l.$$

Für E ergibt sich also aus einer analogen Figur wie Fig. 38 eine ähnliche Kurve wie dort für E_p.

Diese Kurve stellt eine Bedingung für den Generator auf, welche im Grunde nichts ist als eine solche für das magnetische Verhalten seines Eisengestells. Ist nämlich n_g die Drahtzahl auf dem Generatoranker und v_g seine konstante Tourenzahl, so erhält man eine Bedingung für seine Magnetisierungskurve aus der Gleichung

$$E = N_g n_g v_g.$$

Die Aufgabe, ein Magnetgestell mit gewünschter Magnetisierungskurve herzustellen, läßt sich aber unter Benutzung der Gesetze des magnetischen Kreises lösen.

Eine Anlage von der geschilderten Art kann natürlich der veränderlichen Spannung wegen nie gleichzeitig mit Beleuchtungs-

Digitized by Google

anschluß versehen werden. Das Verwendungsgebiet dieses Systems sind kleine Einzelanlagen mit reiner Kraftübertragung unter Verwendung einer Spannung von einigen hundert Volt[1]). Gegenüber Wechselstrom und Drehstrom besteht dabei der Vorteil, daß man eine besondere Maschine zur Erregung des Generators entbehren kann.

Am Schlusse dieses Abschnitts erfolgt zur Erleichterung der Übersicht noch eine kurze Gegenüberstellung der Eigenschaften von Haupt- und Nebenschlußmotoren beim Betriebe mit konstanter Spannung.

Nebenschluſs-Motor.

Anlauf.

Die Zugkraft ist begrenzt durch den Maximalwert der Ankerstromstärke, welche mit Rücksicht auf die Erwärmung zulässig ist. Das Anlaufsmoment übersteigt das normale Drehmoment im Betriebe in demselben Verhältnis wie die in der kurzen Anlaufszeit zulässige Stromstärke die dauernde.

Lauf.

Die Tourenzahl reguliert sich bei allen Belastungen bis auf wenige Prozent selbst. Der geringe Abfall bei zunehmender Belastung kann durch Einschaltung von Regulierwiderständen in den Erregerstrom leicht beseitigt werden. Mit demselben Mittel lassen sich auch größere Tourensteigerungen erreichen; wenn die Zugkraft dieselbe bleiben soll, müssen dann aber größere Modelle verwendet werden.

Hauptstrom-Motor.

Anlauf.

Die Zugkraft ist ebenfalls begrenzt durch den zulässigen Maximalwert des Ankerstromes. Da dieser aber auch die Magnetisierung der Schenkel besorgt, so steigert sich das Anfahrmoment aus doppeltem Grunde. Mit dem Hauptstrom-Motor kann man daher beim Anfahren höhere Anlaufszugkräfte erreichen als mit dem Nebenschluß-Motor. Bei anderthalbfacher normaler Stromaufnahme vergrößert sich die Zugkraft etwa auf das zweifache der normalen.

Lauf.

Der Motor läuft bei großen Belastungen wesentlich langsamer als bei kleinen. Bei Leerlauf geht er durch. Mittels vorgeschalteter Regulierwiderstände oder durch Umschaltung der Erregerwickelung kann die Tourenzahl leicht annähernd konstant gehalten werden. Durch die erstere Methode wird der Wirkungsgrad bei kleinen Belastungen wesentlich herabgedrückt, durch die letztere dagegen

[1]) Beispiele ausgeführter Anlagen finden sich in dem Aufsatze von Ernst Schulz, E.T.Z. v. 8. März 1894.

Digitized by Google

Lauf.

Der Wirkungsgrad ist bei diesem Regulierverfahren bei allen Tourenzahlen gleich; aber bei großem Regulierbereich ist die Ausnutzung des Konstruktionsmaterials unvollkommen. Tourenerniedrigung kann man in beliebigem Umfange bei gleich bleibender Zugkraft durch Vorschaltung von Widerständen vor den Anker erreichen. Der Wirkungsgrad nimmt dann aber annähernd in demselben Maße ab, wie die Tourenzahl, und die Tourenänderungen, welche bei beliebigen Belastungsänderungen auftreten, nehmen zu.

Lauf.

wird er nur wenig beeinflußt. Beide Verfahren gestatten, die Tourenzahlen in den weitesten Grenzen zu variieren, und sind dadurch praktisch sehr einfach, daß Anlassen und Regulieren durch dieselben Vorrichtungen mit einer und derselben Schaltkurbel bewirkt wird.

Das Verwendungsgebiet des Nebenschluß-Motors liegt danach überall dort, wo konstante Tourenzahl ohne viele Wartung verlangt wird. Der Hauptstrom-Motor wird dagegen bei denjenigen Betrieben mit Vorteil benutzt, wo hohe Anzugskraft mit einfacher Regulierbarkeit der Tourenzahl im weitesten Umfange vereint sein muß, und insbesondere da, wo große Zugkräfte bei kleinen Geschwindigkeiten und kleine Zugkräfte bei raschem Laufe ausgeübt werden sollen. Wegen seiner Neigung, bei geringen Belastungen durchzugehen, sollte der Hauptstrom-Motor nur in direkter und unlösbarer Kupplung mit der von ihm anzutreibenden Arbeitsmaschine verwendet werden.

Digitized by Google

VIII. Kompound-Motor und Kompound-Generator.

Das Regulierprinzip des Nebenschluß-Motors, durch eine Schwächung des Magnetfeldes den geringen Tourenabfall ganz zu beseitigen, läßt sich zur Herstellung einer sehr einfachen Vorrichtung verwerten, welche die Regulirung automatisch bewirkt. Die Notwendigkeit nämlich, diese Schwächung in demselben Maße fortschreiten zu lassen, wie die Leistung und auch die Stromaufnahme des Motors zunehmen, legt es nahe, den Motorstrom selbst zur Verringerung der Feldstärke zu benutzen. Man kann dies in einfachster Weise dadurch bewerkstelligen, daß man auf den Magnetschenkeln eine zweite Wickelung von wenigen Windungen anbringt und diese zwischen A und D und zwischen F und G (Fig. 30a) statt der direkten Verbindungsleitungen einschaltet. Wenn man die Windungszahl dieser neuen Wickelung passend wählt und ihren Strom im umgekehrten Sinne um die Schenkel führt als den Strom der Nebenschlußwickelung, so kann man offenbar leicht erreichen, daß die Feldstärke bei allen Belastungen im gewünschten Maße herabgedrückt wird. Auf diese Weise entsteht ein Motor, dessen Schaltung sich schematisch durch Fig. 39 darstellen läßt. Dieser Typus heißt der Kompound- oder Verbund-Motor.

Dem geschilderten Verfahren könnte der Vorwurf gemacht werden, daß die zweite Wickelung den Motor schwerer und teuerer mache und daß überhaupt das Prinzip, zwei gegeneinander wirkende Wickelungen zu benutzen, die beide elektrische Arbeit verzehren, nicht rationell sei. Bedenkt man aber, daß die hinzugefügte Kompoundwickelung das Feld nur um so viele Prozente zu schwächen hat, wie der Spannungsverlust im Anker gegenüber der Anker-Spannung beträgt (bis ca. 5%), so erkennt man, daß diese Wickelung nur aus sehr wenigen Windungen zu bestehen braucht und gegen die Nebenschlußwickelung zurücktritt. Auch beim einfachen Nebenschlußmotor kann die Regulierung der Tourenzahl nicht ohne

Digitized by Google

besonderen Aufwand von Konstruktionsmaterial erreicht werden. Baut man z. B. zwei Nebenschlußmotoren für gleiche Leistung, die bei voller Belastung gleiche Polstärke N und gleiche Stromaufnahme J haben und von denen der eine ohne und der zweite mit Regulierung arbeiten soll, so muß der letztere bei Leerlauf eine um etwa 5% stärkere Magnetisierung erhalten als bei voller Belastung, während für den ersteren die Magnetisierung unverändert bleibt. Um dies möglich zu machen, muß aber die Wickelung der Feldmagnete des regulierbaren Motors von vornherein für eine größere Ampèrewindungszahl berechnet sein, wodurch sie etwas schwerer und teuerer wird. Bei dem geringen Umfange des in Betracht kommenden Regulierbereichs kann aber der Gewichtsunterschied nur sehr klein sein.

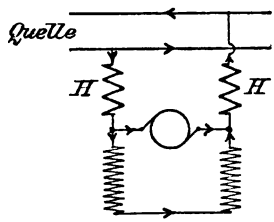


Fig. 39.

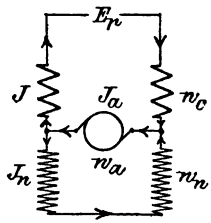


Fig. 40.

Nach dieser Feststellung möge die Frage untersucht werden, ob ein Kompound-Motor, wenn er von seiner Stromquelle abgeschaltet, durch einen Widerstand geschlossen und im alten Sinne künstlich weiter gedreht wird, imstande ist, Strom in diesen Widerstand hineinzuschicken, also ohne Umschaltung der Magnetwicklungen als Generator zu dienen. Die Beantwortung dieser Frage ergibt sich leicht aus Fig. 40, wenn man auf den Nebenschluß-Motor zurückgreift. Von letzterem ist auf S. 77 nachgewiesen worden, daß er als Generator einen Strom im entgegengesetzten Sinne nach außen liefert, als ihm zugeführt werden muß, wenn er als Motor in demselben Sinne rotieren soll, daß aber sein Erregerstrom in beiden Fällen in demselben Sinne fließt. Beim Kompoundmotor verhält sich also die den äußeren Strom führende Verbundwickelung anders als die Nebenschlußwickelung. Während die Nebenschlußwickelung beim Motor und Generator Strom in demselben Sinne führt, kehrt sich die Stromrichtung bei der Kompoundwickelung um. Nimmt man hinzu, daß beim Motor die Einrichtung so getroffen ist, daß sich die magnetisierenden Kräfte beider Wicklungen subtrahieren, so er-

Digitized by Google

kennt man, daß sie sich beim Generator addieren müssen. Da also die Nebenschlußwickelung von der Kompoundwickelung unterstützt wird, so ist es selbstverständlich, daß der Strom des Kompoundgenerators in derselben Richtung nach außen fließen muß, wie bei dem entsprechenden Nebenschluß-Generator, also umgekehrt wie der Strom, der dem Motor zur Herstellung gleichen Drehungssinnes zuzuführen wäre.

Die Erkenntnis von der Addition der beiden magnetisierenden Kräfte lehrt sofort das Verhalten des Kompound-Generators bei verschiedener Stromentnahme überblicken. Während beim Nebenschluß-Generator die Spannung nach S. 78 mit wachsender Stromlieferung abnimmt, werden beim Verbund-Generator durch die wachsende magnetisierende Kraft der Kompoundwickelung gleichzeitig die Polstärke und daher auch die im Anker induzierte E.M.K. und die Spannung der ganzen Maschine gesteigert. Es leuchtet danach ein, daß es durch passende Einrichtung der Verbundwickelung möglich ist, den Spannungsabfall des Nebenschluß-Generators völlig auszugleichen, so daß die Spannung E_p bei allen Stromstärken J konstant bleibt oder sogar mit wachsendem J noch zunimmt. (Überkompoundierung.)

Diese Selbstregulierung der Spannung ist ein großer Betriebsvorteil der Kompoundmaschine, vermöge dessen sie die einfache Nebenschlußmaschine eine Zeit lang zu verdrängen drohte. Für Lichtbetriebe ist man indessen fast allgemein wieder auf die Verwendung der Nebenschlußmaschine zurückgekommen, da hier der Stromkonsum sich im Laufe des Tages nur in langsamen Schritten ändert, und der Maschinenwärter mittels des Nebenschlußregulators die Spannung sehr leicht nachregulieren kann. Hierzu kommt, daß Nebenschlußmaschinen besser mit Akkumulatoren zusammen arbeiten als Kompoundmaschinen. Bei Kraftbetrieben indessen, bei denen die angehängten Motoren sehr häufig ein- und ausgeschaltet werden und die Stromentnahme daher sehr schwankend ist, pflegt man Kompoundgeneratoren oder auch überkompoundierte Maschinen zu verwenden, um gleichzeitig auch den Spannungsabfall in den Leitungen zu decken.

Um einen Einblick in die Strom- und Energieverteilung in einer modernen Kompoundmaschine zu bieten, folgt hier noch die Betrachtung eines Beispieles. Ein Bahn-Generator, welcher normal bei $E_p = 550$ Volt $J = 184$ Amp. erzeugt, hat einen Ankerwiderstand

Digitized by Google

$w_a = 0{,}06$ Ohm, einen Widerstand der Nebenschlußwickelung von $w_n = 94$ Ohm und der Kompoundwickelung von $w_c = 0{,}002$ Ohm (Fig. 40). Da der nach außen gelieferte Strom J auch durch die Kompoundwickelung fließt, so tritt in der letzteren ein Spannungsabfall von $J w_c = 184 \cdot 0{,}002 = 0{,}368$ Volt ein. Um diesen Wert ist die Ankerspannung E_{pa} höher als die Spannung E_p am Ende der Kompoundwickelung oder die Klemmenspannung der ganzen Maschine. Es ist also $E_{pa} = 550 + 0{,}368 = 550{,}37$ Volt. Da die Ankerspannung E_{pa} auch an den Enden der Nebenschlußwickelung w_n herrscht, so fließt in letzterer ein Strom $J_n = E_{pa} : w_n = 550{,}37 : 94 = 5{,}86$ Amp. Der Anker als der Sitz der ganzen Stromerzeugung der Maschine muß einen Strom J_a führen, der sich beim Austritt aus dem Anker in den äußeren Strom J und den Nebenschlußstrom J_n verzweigt, also gleich der Summe aus den letzteren beiden ist. Daher ist $J_a = 184 + 5{,}86 = 189{,}86$ Amp.

Die elektrische Arbeit, welche die Ströme beim Durchfließen der drei Widerstände w_c, w_n und w_a sekundlich zu leisten haben, ergibt sich nach Gl. 6 S. 10, indem jeder Widerstand mit dem Quadrate der durch ihn fließenden Stromstärke multiplicirt wird. Man erhält

$$\begin{aligned} J^2 w_c &= 184^2 \cdot 0{,}002 = 67{,}7 \text{ Watt}, \\ J_n^2 w_n &= 5{,}89^2 \cdot 94 = 3228 \text{ Watt}, \\ J_a^2 w_a &= 190^2 \cdot 0{,}06 = 2166 \text{ Watt}, \\ \text{und die Summe} &= 5462 \text{ Watt}. \end{aligned}$$

Dieser Betrag setzt sich in den Wickelungen der Schenkel und des Ankers in Wärme um und geht für die elektrische Energieerzeugung des Generators verloren. Während die nach außen abgeführte elektrische Arbeitsleistung

$$E_p J = 550 \cdot 184 = 101\,200 \text{ Watt}$$

beträgt, müßten also insgesamt

$$101\,200 + 5462 = 106\,662 \text{ Watt}$$

erzeugt werden. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt daher

$$\eta = \frac{101\,200}{106\,662} = 0{,}949.$$

Von der gesamten erzeugten elektrischen Energie werden also rd. 95% nutzbar gemacht, 2% gehen im Anker und 3% in der Nebenschlußwickelung der Magnetschenkel verloren. Der Energieverbrauch der Kompoundwickelung kommt nicht in Betracht. Er beträgt nur ungefähr 0,6‰.

Digitized by Google

IX. Elektrische Bremsung, Kraftrückgabe, Umsteuerung.

Die Eigenschaft der Elektromotoren, gleichzeitig auch als Generatoren zu arbeiten, bietet ein einfaches Mittel, sie und die von ihnen angetriebenen Fahrzeuge oder Maschinen mit großer Kraft zu bremsen. Schaltet man den Motor von dem Netz, welches ihn speist, ab und schließt ihn durch einen Widerstand, so läuft er durch seine lebendige Kraft und diejenige der mit ihm zusammengekuppelten Massen weiter und schickt als Generator Strom in den Widerstand hinein. Da die elektrische Energie, welche er als solcher erzeugt, nur der Bewegungsenergie der Massen entnommen werden kann, so wird die letztere vermindert, und die Massen werden gebremst. Die auf diese Weise zerstörte lebendige Kraft findet sich in den Wickelungen des Motors und im äußeren Widerstande desselben als Wärme wieder.

Zur Anwendung dieses allgemeinen Prinzips muß allerdings bemerkt werden, daß bei der einfachen Umschaltung auf einen Widerstand nur der Nebenschluß-Motor und der Kompound-Motor nach den früheren Betrachtungen direkt als Generator Strom geben können, während beim Hauptstrom-Motor erst die Wickelungsanschlüsse der Magnetschenkel vertauscht werden müssen. Da dies aber gleichzeitig mit der Umschaltung auf den Widerstand durch eine einfache Hebelkonstruktion geschehen kann, so bietet auch beim Hauptstrom-Motor die praktische Durchführung dieser Bremsmethode keine Schwierigkeiten.

Die elektrische Arbeit, welche der Motor als Generator sekundlich erzeugt, ist gegeben durch das Produkt seiner E.M. K. e und des Stromes J, den sein Anker liefert. Die sekundlich abgebremste mechanische Energie übersteigt diesen Betrag noch um die mechani-

Digitized by Google

schen Arbeitsverluste durch Zapfenreibung etc., welche bei der Rotation des Ankers auftreten. Da nun e mit der Tourenzahl abnimmt, so muß die Bremswirkung bei heruntergehender Geschwindigkeit geringer werden. Dieser Übelstand ist charakteristisch für die elektrische Bremsung. Man kann ihm aber dadurch begegnen, daß man die Stromstärke J in demselben Maße vergrößert, wie e sich vermindert. Zu diesem Zwecke braucht man nur den Widerstand, durch den der Generator geschlossen wird, regulierbar zu machen und von Hand oder automatisch allmählich zu verkleinern und schließlich „kurz zu schließen".

Eine noch weit kräftigere Bremswirkung kann man erreichen, wenn man die elektrische Arbeitsleistung des Generators sich nicht einfach im Widerstande verzehren lässt, sondern dazu benutzt, ein Drehmoment entgegen der Massenbewegung zu erzeugen. Eine derartige Vorrichtung ist die sogenannte Wirbelstrombremse, welche auf folgendem Prinzip beruht: Die Induktion einer E.M.K. in der Bewickelung eines Gleichstromankers ist ein Spezialfall einer allgemeinen Naturerscheinung, welche sich auf jeden Leiter, d. h. auf jeden Metallkörper erstreckt, der in einem magnetischen Felde bewegt wird. In solchen Metallmassen werden immer elektrische Ströme induziert. Diese Ströme müssen offenbar mit denjenigen einer Ankerwickelung die Eigenschaft gemeinsam haben, daß die mechanischen Kräfte, welche zwischen ihnen und den Magnetfeldern nach dem auf S. 40 angegebenen Grundgesetze entstehen, die Bewegung der Leiter zu hemmen suchen; denn die elektrische Arbeit, welche von den Strömen in den Metallmassen geleistet und in Wärme umgesetzt wird, muß in einem mechanischen Arbeitsaufwand ein Äquivalent haben. Diese Erscheinung kann z. B. in der Weise zu einer Bremsung ausgenutzt werden, daß man einen kompakten cylindrischen Eisenkern auf die zu bremsende Achse setzt und ihn mit einem Magnetgestell etwa wie in Fig. 9 S. 24 umgibt, das nur dann erregt wird, wenn Bremsung eintreten soll. Der genaue Verlauf und die Stärke der Ströme in beliebig gestalteten Metallkörpern ist allerdings nur mit größter Schwierigkeit zu berechnen, da hier keine bevorzugte Richtung wie bei lang ausgestreckten Drähten vorhanden ist. Man bezeichnet solche Ströme als „Wirbelströme"[1]).

[1]) In den Ankern von Generatoren und Motoren müssen diese Wirbelströme natürlich vermieden, und der Stromfluß muß allein auf die Be-

Digitized by Google

Konstruktiv wird der Metallkern gewöhnlich nicht als Cylinder, sondern als flache Eisenscheibe ausgebildet, und das Magnetgestell als ein Kranz von Polen, welcher der einen Stirnfläche dieser Scheibe gegenübergestellt wird. Sobald das Magnetgestell erregt ist, sucht es natürlich die Eisenscheibe anzuziehen, woraus sich die Möglichkeit ergibt, auch noch die mechanische Reibung zur Bremsung zu benutzen. Die ganze Vorrichtung wirkt dann in dreifacher Weise bremsend: 1) dadurch, daß der in einen Generator verwandelte Motor den bewegten Massen Energie entzieht, diese zunächst in elektrische Energie und dann in seinen eigenen Wickelungen und in der Erregerwickelung der Wirbelstrombremse in Wärme umsetzt; 2) dadurch, daß jene Eisenscheibe infolge der Bildung von Wirbelströmen der Massenbewegung weitere Energie entnimmt und in Wärme verwandelt[1]); 3) durch einfache mechanische Reibung, welche ebenfalls Wärme erzeugt. Wenn man den Stoß vermeiden will, den der Anker bei der Umschaltung des Motors zum Generator wegen der plötzlichen Umkehr des Drehmomentes erfährt, so kann man natürlich auch das Magnetgestell der Wirbelstrombremse durch einen besonderen Strom erregen und die Bremswirkung der Wirbelströme allein benutzen.

Die Fähigkeit des Motors, als Generator zu wirken, schafft andererseits die Möglichkeit, bei der Bremsung Strom in das Netz zurückzuschicken, von welchem der Motor vorher gespeist wurde. Dazu ist nötig, 1) daß der Motor als Generator Strom im umgekehrten

---

wickelung beschränkt werden. Man erreicht dies, indem man für die Anker nicht kompakte Eisenstücke verwendet, sondern sie aus Blechen zusammensetzt. Die Wirkungsweise dieser Methode wird im Abschnitt XII besprochen werden.

[1]) Bei oberflächlicher Betrachtung könnte man zu der Ansicht kommen, daß die Energie der Wirbelströme direkt aus der elektrischen Arbeit des Generators entnommen werde, weil dieser die Magnete der Wirbelstrombremse erregt. Dies ist indes nicht der Fall, denn jener Erregerstrom schafft durch die Magnetisierung nur die Verhältnisse, welche die Bildung von Wirbelströmen ermöglichen. Die Aufrechterhaltung des magnetischen Zustandes der Pole kostet aber keine Arbeit als diejenige, welche in der Erregerwickelung in Wärme umgesetzt wird und auch umgesetzt werden würde, wenn die Wickelung gar nicht zur Erregung von Magneten diente. (S. 29). Die Arbeit der Wirbelströme wird also direkt aus der Bewegungsenergie der Scheibe und der mit ihr gekuppelten Massen entnommen.

Digitized by Google

Sinne erzeugt, als er vorher aufnahm, und 2) daß der Generator elektrischen Überdruck hat, d. h. seine E.M.K. größer ist als die Spannung des Netzes, denn sonst würde umgekehrt der Strom vom Netz in den Generator übergehen. Die erstere Bedingung wird, wie früher gezeigt wurde, beim Nebenschluß- und beim Kompound-Motor ohne weiteres erfüllt, beim Hauptstrom-Motor nach Umschaltung der Feldmagnet-Wickelung. Die Erfüllung der zweiten Bedingung muß für die drei Motortypen besonders diskutiert werden.

Die Betrachtungen mögen sich anknüpfen an das allgemein gebräuchliche System der Parallelschaltung, bei dem ein ganzes Leitungsnetz unter konstanter Spannung E_p gehalten wird und die Motoren einzeln an Hin- und Rückleitung angeschlossen werden. In diesem Falle muß also der Motor, welcher als Generator Kraft zurückgeben soll, als solcher eine höhere E.M. K. e erzeugen, als die konstante Netzspannung E_p beträgt.

Beim Hauptstrom-Motor sieht man sofort, daß er diese Bedingung nicht bei allen Belastungen erfüllen kann, denn seine Charakteristik hat die Gestalt der Kurve E_p in Fig. 38, d. h. seine Spannung ist bei geringer Stromlieferung sehr klein, bei stärkerer dagegen groß.

Dazu kommt, daß zur Umwandlung in einen Generator seine Erregerwickelung erst umgeschaltet, und er für diesen Zweck zunächst vom Verteilungsnetz losgelöst werden müßte. In diesem „offenen" Zustand (bei $J = 0$) würde der Generator aber keine E.M.K. erzeugen und könnte deshalb garnicht an das Netz angeschlossen werden, ohne daß er vorher durch einen passenden Widerstand geschlossen und durch Stromlieferung in denselben auf die Netzspannung gebracht würde. Selbst, wenn er aber in geeigneter Weise mit dem Netz verbunden wäre und Strom in dasselbe hineinlieferte, so würde er bei einem geringen Nachlassen seiner E.M.K. nicht als Motor, von der Netzspannung getrieben, in der alten Richtung weiter laufen können; er würde vielmehr, da seine Erregerwickelung umgeschaltet ist, stehen bleiben und seine Drehrichtung umzukehren suchen. Die Verwendung des Hauptstrommotors zur Kraftrückgabe in ein Verteilungsnetz ist demnach ausgeschlossen.

Anders verhält sich der Nebenschluß-Motor. Als Generator laufend, liefert dieser ohne Umschaltung einen Strom im entgegengesetzten Sinne, wie er als Motor bei gleicher Drehrichtung aufnahm. Die Bedingung, daß die E.M.K. e des Generators größer wird als E_p, kann sehr leicht dadurch erfüllt werden, daß man durch den Nebenschluß-Regulierwiderstand die Erregung und damit N verstärkt. Wenn hier e durch eine Störung kleiner als E_p wird, so

Digitized by Google

läuft der Generator als Motor in demselben Sinne weiter (S. 78). Ein Nebenschluß-Motor läßt sich also immer zur Kraftrückgabe benutzen.

Diese Eigenschaft der Nebenschlußmaschinen ist die wichtigste Grundlage für ihre Verwendbarkeit als Stromerzeuger in Parallelschaltung. Da diese Betriebsart in den modernen Elektricitätswerken weitaus die gebräuchlichste ist, so hat die Nebenschlußmaschine als Gleichstrom-Generator sehr große Bedeutung erlangt. Wenn nun auch die Besprechung der Elektricitätserzeugung nicht die Aufgabe dieses Buches ist; so möge doch die sich an dieser Stelle bietende Gelegenheit benutzt und die Arbeitsweise der Nebenschlußmaschine in solchen Betrieben kurz besprochen werden.

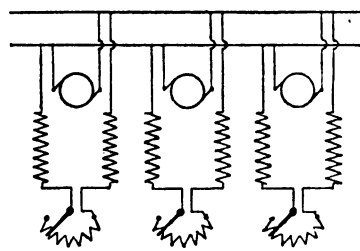


Fig. 41.

In Fig. 41 sind drei Nebenschluß-Maschinen in Parallelschaltung dargestellt. Sie arbeiten auf die Hauptverteilungsschienen eines Schaltbrettes, an welche die Kabel des Netzes angeschlossen sind. Ihre Aufgabe, bei allen Belastungen des Netzes eine konstante Spannungsdifferenz zwischen jenen Schienen aufrecht zu erhalten, läßt sich am leichtesten erfüllen, wenn man die Erregerwickelung direkt von diesen Schienen aus speist. Die Generatoren arbeiten dann in folgender Weise:

Sind die E.M. Kräfte der einzelnen Maschinen e_1, e_2, e_3, und ist die gemeinsame Netzspannung E_p, der Widerstand eines jeden der Anker w, so ergeben sich die Ankerströme J_1, J_2, J_3, welche in das Netz hineingeliefert werden, aus den Gleichungen

$$e_1 = E_p + J_1 w$$
$$e_2 = E_p + J_2 w$$
$$e_3 = E_p + J_3 w.$$

Der Anteil einer Maschine an der gesamten Stromlieferung steigt also mit ihrer E.M.K. und läßt sich durch die Erregung leicht

Digitized by Google

regulieren. Beträgt z. B. die Netzspannung 110 Volt und in jeder der Maschinen der Spannungsabfall Jw bei normaler Stromlieferung 2,5%, also 2,75 Volt, so müssen die E.M. Kräfte die Größe $110 + 2{,}75 = 112{,}75$ Volt haben. Steigt bei einem der Generatoren infolge mangelhafter Regulierung der Antriebsmaschine die E.M.K. mit der Tourenzahl plötzlich um 0,5 Volt, also auf 113,25 Volt, so muß im Anker desselben ein Spannungsverlust von $113{,}25 - 110 = 3{,}25$ Volt eintreten, und daher der Strom im Verhältnis von $3{,}25 : 2{,}75$, also um 18% steigen. Diese sehr starke Überlastung der voraneilenden Maschine hat natürlich sogleich wieder ein Zurückbleiben zur Folge, bis die alte Tourenzahl wieder erreicht ist. Umgekehrt wird ein plötzliches Nachlassen der Drehgeschwindigkeit infolge einer Störung der Regulierung durch eine plötzliche Entlastung sofort wieder ausgeglichen. Dadurch wird der Betrieb der parallel geschalteten Nebenschlußmaschinen vollständig stabil. Sollte einer der Generatoren plötzlich so weit zurückbleiben, daß er nur eine kleinere E.M.K. entwickelte, als die Spannung des Netzes beträgt, so läuft er als Motor in demselben Sinne weiter und wird von den anderen Generatoren alsbald nachgeholt.

Neben der Kraftrückgabe bei der Bremsung bildet der Wiedergewinn der Kraft bei der Umkehr der Bewegung ein interessantes technisches Problem. Wichtige Betriebe, bei denen diese Aufgabe dem Ingenieur entgegentritt, sind z. B. Bergbahnen und Hebezeuge, wenn sie sich abwärts bewegen. Dem Elektrotechniker stellt sich hierbei die Aufgabe in der Form, daß der Motor als Generator rückwärts laufend einen Strom im umgekehrten Sinne erzeugen muß, wie er als Motor aufnimmt. Da für den Nebenschluß-Motor soeben gezeigt worden ist, daß er den gewünschten Strom liefert, wenn er als Generator in demselben Sinne weiter läuft, so ergibt sich, daß er bei Rückwärtsgang einen Strom in falschem Sinne erzeugt und daher eine Umschaltung des Ankers, d. h. eine Vertauschung seiner Anschlüsse an das Netz oder eine Umschaltung seiner Erregerwickelung, d. h. eine Umpolarisierung notwendig wird.

Als letzter Typus wäre nun noch der Kompound-Motor auf seine Fähigkeit der Kraftrückgabe zu untersuchen. Die Betriebsverhältnisse, bei denen derselbe zweckmässig benutzt wird, sind aber wohl stets derartig, dass eine Wiedergewinnung der Kraft ökonomisch wertlos ist. Der Kompound-Motor ist dort zu verwenden, wo eine ganz konstante Geschwindigkeit unabhängig von der Belastung ohne

Digitized by Google

besondere Wartung verlangt wird. Bei allen Betrieben, bei denen Kraftrückgabe Wert hat, weil sehr häufiges Bremsen oder regelmäßige Umkehr der Drehrichtung stattfinden, sind indessen die Motoren stets unter Aufsicht, und es kommt mehr darauf an, daß sie dem Regulierhebel des Wärters schnell und in weitem Umfange folgen, als daß sie ihre Tourenzahl automatisch auf das feinste selbst einregulieren. So kommt also schließlich für die Kraftrückgabe an das Netz nur der Nebenschluß-Motor in Frage.

Allgemeiner als das Bedürfnis des Kraftwiedergewinnes tritt im Betriebe von Elektromotoren die Forderung ihrer Umsteuerbarkeit auf. Diese läßt sich auf außerordentlich einfache Weise erfüllen. Aus der Regel auf S. 40 über die Richtung der Zugkraft geht hervor, daß man die Drehrichtung des Ankers eines Motors dadurch umkehren kann, daß man entweder die Stromrichtung im Anker *oder* die Richtung der magnetischen Kraft der Pole umkehrt. Eine gleichzeitige Kommutierung *beider* Richtungen würde aber eine Umsteuerung nicht bewirken. Auf dieser einfachen Grundlage sind Steuervorrichtungen in den mannigfachsten Formen konstruiert worden. Wo es auf besonders plötzliches Bremsen ankommt, können sie gleichzeitig zur Lieferung von „Gegenstrom“ benutzt werden.

Digitized by Google

X. Funkenbildung an Bürsten und Kommutator.

Bei der Besprechung der Wirkungsweise des Kommutators auf S. 46 ist einer Erscheinung noch nicht Erwähnung getan, welche jedem bekannt ist, der den Betrieb eines Gleichstrom-Motors beobachtet hat: die Funkenbildung an der Stelle, wo die Bürsten aufliegen. Diese Erscheinung ist von sehr großer betriebstechnischer Wichtigkeit, da die Funken kleine Vertiefungen in den Kommutator brennen und die so entstehende Rauhigkeit der Auflagefläche ihrerseits das „Feuern" verstärkt. Die gegenseitige Steigerung beider Erscheinungen macht ein häufiges Abschmirgeln des Kommutators notwendig und kann zu unzulässigen Graden von Abnutzung und Wartung führen. Eine Betrachtung der Ursachen der Funkenbildung und der Mittel zu ihrer Vermeidung ist demnach von Wichtigkeit.

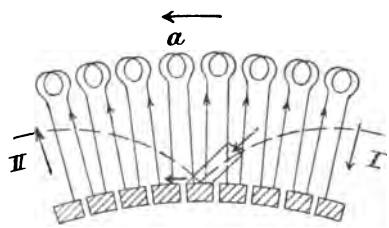


Fig. 42.

Da das Funken gerade an der Auflagefläche der Bürsten vor sich geht, so ist es zweckmäßig, die neben einer Bürste liegenden Kommutatorlamellen und die daran angeschlossenen Spulen gesondert ins Auge zu fassen. In Fig. 42 sind diese Lamellen für sich dargestellt. Die Bürste liegt wieder in der neutralen Achse, der Trennungslinie der beiden festliegenden Magnetfelder I und II, welche entgegengesetzt gerichtet und in der Figur ebenfalls angedeutet sind. Der in den

Digitized by Google

Anker eintretende Strom teilt sich in dem Kommutatorsegment, das die Bürste berührt, und durchfließt die rechts und links gelegenen Spulen in verschiedenem Sinne. Fig. 42 entspricht also den Fig. 21—23.

Bei der Betrachtung der letzteren ist festgestellt worden, daß die gezeichnete Stromverteilung auch während der Bewegung des Ankers bestehen bleibt, da der Strom aus der Bürste die einfache Verzweigung nach rechts und links bei jeder Ankerstellung in gleicher Weise vornehmen muß. In Wirklichkeit entsprechen aber die Vorgänge dieser Folgerung nicht völlig, weil die Umkehr des Stromes in den Spulen beim Vorübergang an der Bürste nicht plötzlich und in unendlich kurzer Zeit vor sich gehen kann. Offenbar ist ein so schneller Wechsel deswegen nicht möglich, weil die lebendige Kraft der elektrischen Massen in der betreffenden Spule erst vernichtet, und eine entgegengesetzte Massenbewegung von gleicher Energie hergestellt werden muß, ehe der umzukehrende Strom die alte Stärke in der neuen Richtung annimmt. Die Vorgänge in den Spulen, welche gerade die Bürste passiert haben, müssen also noch besonders betrachtet werden. Die folgende Darstellung soll sich beziehen auf diejenige Spule, welche in der Fig. 42 mit *a* bezeichnet ist; die Bewegung von Spule und Kommutator gehe dabei von rechts nach links.

Bevor Spule *a* die gezeichnete Stellung eingenommen hat, befand sie sich rechts vor der Bürste im Magnetfelde I und wurde von demselben Strom durchflossen, wie die übrigen dort befindlichen Spulen. Darauf trat ein Augenblick ein, wo die Lamellen, an welche *a* angeschlossen ist, beide gleichzeitig die Bürste berührten. In diesem Moment ist *a* durch die Bürste „kurz geschlossen". Die Stromzufuhr aus der Bürste hört auf, da der Strom an beiden Enden in *a* eintreten kann, aber die frühere Bewegung der elektrischen Massen dauert in *a* noch fort. Infolge der Trägheit hält dieser Bewegungszustand auch noch an, wenn *a* unter das Magnetfeld II tritt und die in der Figur gezeichnete Stellung erreicht. Der Strom in *a* fließt dann entgegen dem Strome in den übrigen Spulen des Feldes II und auch entgegen dem aus der Bürste kommenden Strome *i*. Der letztere kann jetzt also, wenn er die Bürste verläßt und sich in die linke Ankerabteilung abzweigen will, nicht mehr ungestört durch *a* zu den übrigen Spulen gelangen, sondern stößt auf die in *a* ihm entgegenfließenden Massen, und beide schlagen sich nun in Gestalt eines Funkens eine gemeinsame Brücke über die Isolationsschicht

Digitized by Google

hinweg, welche die mit *a* verbundenen Kommutatorlamellen trennt. Nachdem er diese Funkenbrücke überschritten hat, fließt der Strom *i* in derselben Weise durch die übrigen Spulen der linken Abteilung, als wenn jene Massenwirkung nicht vorhanden wäre.

Zur Vermeidung der Funkenbildung muß daher nach einem Mittel gesucht werden, die lebendige Kraft der Massenbewegung während des Kurzschlusses durch die Bürste zu vernichten oder noch besser, diese Bewegung umzukehren und in *a* einen Strom von der Richtung und Stärke desjenigen herzustellen, wie er in den übrigen Spulen der Ankerabteilung herrscht, in die *a* eintritt. Wenn letzteres sich erreichen läßt, so wird der aus der Bürste kommende Strom offenbar einer Funkenbrücke nicht mehr bedürfen, sondern direkt durch die neu eingetretene Spule zu den übrigen Spulen derselben Abteilung fließen.

Ein Mittel, die Massenbewegung in *a* während des Kurzschlusses zu hemmen, bietet z. B. die Verwendung von Kohlenbürsten durch den Übergangswiderstand, welchen der Stromfluß beim Übertritt aus einer Kommutatorlamelle in eine Bürste und beim Rückfluß in die benachbarte Lamelle erfährt. Die Massenbewegung vollendet beim Kurzschluß ihren Kreislauf dadurch, daß die elektrischen Massen aus der Spule heraus in die Bürste eintreten und durch die benachbarte Lamelle, die von der Bürste gleichzeitig berührt wird, in die Spule zurückströmen. Der „Übergangswiderstand“ muß also wie ein passiver Widerstand die Bewegung der Massen hemmen. Da er bei den harten Kohlenbürsten größer ist als bei den weichen sich besser an die Lamellen anschmiegenden Kupferbürsten, so erklärt sich leicht die Möglichkeit, mit Kohlenbürsten die Funkenbildung herabzudrücken. Hierbei möge hervorgehoben werden, daß ein loses Aufliegen der Bürsten den Vorteil dieses Übergangswiderstandes nicht zu bieten vermag. Wenn die Bürsten mit zu geringem Drucke an den Kommutator angepreßt werden, so werden sie durch die kleinen Unebenheiten desselben hin- und hergeschleudert und der Kontakt zwischen beiden Teilen wird häufig schlecht oder hört ganz auf, so daß der Strom gezwungen ist, eine Funkenbrücke zu schlagen, um überhaupt von der Bürste zum Kommutator übergehen zu können. Diese Überlegung weist von neuem auf die Notwendigkeit hin, die Oberfläche des Kommutators glatt und blank zu halten, wie überhaupt die Vorschriften für die Behandlung des Kommutators, welche bei der Lieferung von Elektromotoren jetzt jederzeit beigegeben werden, genau zu beachten.

Digitized by Google

Ein von Elektro-Konstrukteuren bei großen Maschinen öfters angewendeter Kunstgriff, welcher in derselben Weise wirkt wie der Übergangswiderstand der Bürste, möge hier nebenbei erwähnt werden. Bei einem Anker wie in Fig. 22 kann man z. B. die radialen Verbindungsstücke von den Spulen zu den Kommutatorsegmenten aus weit dünneren Drähten herstellen als die Ankerwickelung selbst. Da der Strom beim Kurzschluß einer Spule immer zwei dieser Drähte durchfließen muß, so findet seine Bewegung darin den gewünschten Widerstand. Eine zu starke Erwärmung braucht selbst bei sehr dünnen Drähten nicht befürchtet zu werden, da durch die Bewegung für ausgibige Ventilation jedes einzelnen gesorgt ist und nur dann Strom durch ihn hindurchgeht, wenn die an ihn angeschlossene Kommutatorlamelle eine Bürste passiert.

Das vorher erwähnte wirksamste Mittel der völligen Umkehr des Stromes während des Kurzschlusses kann leicht gewonnen werden durch passende Ausnutzung des benachbarten magnetischen Feldes. Grundsätzlich kann man eine Umkehr des Stromes natürlich nur erreichen durch Übertragung von Energie entgegengesetzten Sinnes auf jede Masseneinheit, d. h. durch Induktion einer elektromotorischen Gegenkraft von genügender Größe. Da der Strom in Spule *a* während des Kurzschlusses noch dieselbe Richtung hat, wie bei den Spulen in Feld I, so muß die E.M.K., welche die Umkehr besorgen soll, ebenso gerichtet sein, wie die elektromotorische Gegenkraft in diesen Spulen. Um eine solche E.M.K. aber auch in Spule *a* zu erhalten, genügt es, den Kurzschluß innerhalb des Feldes I vorzunehmen, also die Bürste aus der neutralen Achse heraus ein wenig in das Feld I zurückzurücken. Die letztere Schlußfolgerung wird sofort verständlich durch den Hinweis auf Gl. 29 und ihre Ableitung auf S. 56, welche besagt, daß in jedem äußeren Leiter eines Ankers — gleichgültig, ob er einem Generator oder Motor angehört, — eine E.M.K. induziert wird, welche bei gleicher Drahtlänge und Umfangsgeschwindigkeit nur von der radialen magnetischen Kraft $\mathfrak{B}_r$ an der Stelle abhängt, an welcher sich der Leiter gerade befindet. Feld I, welches in allen übrigen in seinem Bereiche befindlichen Ankerspulen eine elektromotorische Gegenkraft induziert, wird also auch in der kurzgeschlossenen eine solche E.M.K. hervorbringen, welche bei richtiger Größe den darin noch vorhandenen Strom gerade umzukehren vermag. Daß in den anderen Spulen des

Digitized by Google

Feldes I eine Umkehr des Stromes durch die Gegenkraft nicht stattfindet, darf nicht wundern, da in diese der Strom von außen durch die überwiegende Spannung E_p hineingedrückt wird, während in die kurzgeschlossene ein Strom von außen nicht eintritt.

Ist die Bürste zur Herstellung des funkenlosen Ganges aus der neutralen Achse nach B (Fig. 43) zurückgerückt, so ist damit auch die Scheidelinie für die Stromrichtung in den äußeren Leitern des Ankers verschoben, und die an Fig. 19 und 20 erörterten Bedingungen für die Addition der Drehmomente sind nicht mehr erfüllt. Die

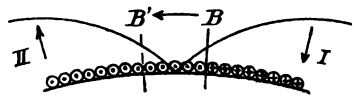


Fig. 43.

zwischen B und der neutralen Achse (Fig. 43) gelegenen Windungen geben vielmehr ein umgekehrtes Drehmoment als die übrigen Windungen des Feldes I, da sie von umgekehrtem Strome durchflossen werden. Zur Kompensation dieses Drehmoments muß eine gleiche Anzahl von Windungen auf der anderen Seite der neutralen Achse, zwischen der letzteren und B' verwendet werden, so daß Magnetfeld und Ankerdrähte zwischen B und B' für die Zugkraft des Ankers keinen Beitrag liefern. Funkenloser Gang entspricht also nicht der maximalen Leistung des Ankers.

Die genannte Erscheinung tritt noch stärker hervor, wenn an zwei benachbarte Kommutatorsegmente nicht einzelne Windungen, sondern ganze Spulen, bestehend aus einer größeren Anzahl von Windungen, angeschlossen sind. Da jede Windung zur Umkehr ihres Stromes beim Kurzschluß einzeln einer elektromotorischen Gegenkraft bedarf, so müssen die Bürsten um so weiter in Feld I zurückgeschoben werden, je größer die Windungszahl jeder Spule ist. Dem Vorteil eines einfacheren Kommutators mit geringerer Segmentzahl würden also stärkere Funkenbildung oder verminderte Motorleistung als Nachteile gegenüberstehen.

Beim Generator können dieselben Mittel zur Verkleinerung der Funkenbildung benutzt werden wie beim Motor, nur daß hier die Bürsten nicht entgegen, sondern in dem Bewegungssinne verstellt werden müssen. Dies ergibt sich einfach daraus, daß beim Ge-

Digitized by Google

nerator die Richtung der induzierten E.M.K. mit derjenigen des Stromes in jeder Spule zusammenfällt. Wenn also beim Kurzschluß einer Spule die Stromrichtung umgekehrt werden soll, so muß die Spule in ein Feld von entgegengesetzter Richtung gebracht werden. Gehört z. B. Fig. 42 einem Generator an, so muß der Kurzschluß der aus Feld I austretenden Spule *a* in Feld II vorgenommen werden.

Digitized by Google

XI. Ankerrückwirkung.

Die in den vorangehenden Kapiteln abgeleiteten Eigenschaften der Elektromotoren werden von einem Vorgang noch etwas modifiziert, dessen Einfluß für ihre Konstruktion und ihren Betrieb von Wichtigkeit ist, nämlich von der Magnetisierung des Ankers durch seine eigenen Windungen. Das magnetische Feld, welches den stromdurchflossenen Ankerwindungen den Antrieb gibt, ist bisher erzeugt gedacht worden allein durch die äußeren Magnetpole, d. h. durch die Ampèrewindungen der „Erregerspulen", welche über die Magnetschenkel geschoben sind. Bei schärferem Hinblick erkennt man aber leicht, daß außer diesem Felde noch ein anderes vorhanden ist, welches von den Ampèrewindungen der Ankerspulen hervorgerufen wird und ebenfalls längs des Ankerumfanges verteilte radiale Kraftkomponenten besitzen muß. Erst die Vereinigung dieses Ankerfeldes mit dem Felde der Pole, welches als das „Hauptfeld" bezeichnet werden möge, ergibt ein resultierendes „Gesamtfeld", das für die Erzeugung der Triebkraft maßgebend ist. Um die Verteilung der Intensität des resultierenden Feldes zu bestimmen, muß also zunächst die Verteilung des Ankerfeldes festgestellt werden.

Die Stärke des Ankerfeldes ergibt sich als die Summe der magnetischen Kräfte, welche die einzelnen Ankerleiter an jeder Stelle erzeugen. Es ist daher zunächst das magnetische Feld zu betrachten, welches ein beliebiger gerader stromdurchflossener Leiter herstellt. Experimentell erhält man leicht ein Bild von diesem Felde, wenn man ein Kartonblatt mit einem Loch versieht, einen Leiter hindurchzieht, senkrecht darauf stellt und auf das Blatt Eisenfeilspäne streut. Der Versuch zeigt, daß die Kraftlinien des Leiters mit dem Querschnitte des letzteren konzentrisch verlaufende Kreise sind, welche umsoweniger dicht an einander liegen, je weiter sie von dem Leiter entfernt sind, da die magnetische Kraft mit der Entfernung abnehmen muß. Ent-

Digitized by Google

lang dieser Kreise verläuft die magnetische Kraft im Sinne des Uhrzeigers für einen Beschauer, der längs des Leiters in der Richtung des Stromflusses blickt. Allen Leitern, deren Querschnitte in den Figuren dieses Buches mit Kreuzen versehen sind, gehören also ebenfalls Kraftlinien im Uhrzeigersinne an, während die mit Punkten bezeichneten Leiter Kräfte vom umgekehrten Verlaufe ergeben.

Unter Benutzung dieses Gesetzes als Grundlage wäre also z. B. für eine Stromverteilung nach Fig. 20 die Verteilung der Feldintensität längs der Ankerperipherie festzustellen.

Um die magnetische Kraft in irgend einem Punkte des Ankerumfanges zu bestimmen, müßte man um alle Leiterquerschnitte Kreise im oder entgegen dem Uhrzeigersinne mit solchen Radien

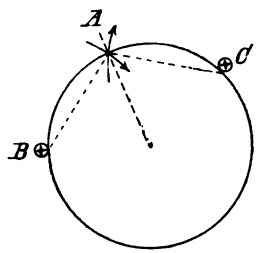


Fig. 44 a.

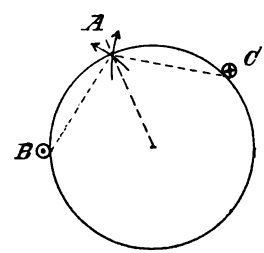


Fig. 44 b.

schlagen, dass sie gerade durch diesen Punkt hindurchgingen. Die Richtung der Kreisbögen an jeder Stelle würde dann die Richtung der magnetischen Kräfte ergeben, und unter Berücksichtigung der Größe einer jeden einzelnen, welche sich aus dem Abstand des zu ihr gehörenden Leiters ergibt, müßte die resultierende Kraft bestimmt werden.

Ohne auf das Gesetz für den Zusammenhang zwischen Abstand und Kraftgröße näher einzugehen, übersieht man sofort die allgemeine Art der Kraftverteilung um den Anker, wenn man immer diejenigen beiden Leiter gleichzeitig ins Auge faßt, welche gleichen Abstand von dem Punkte des Umfanges haben, den man gerade betrachten will. Für den Punkt A in Fig. 44 a und b würden z. B. die Leiter B und C in dieser Art zusammengehören und magnetische Kräfte von gleicher absoluter Größe in A erzeugen. Wenn nun B und C von Strömen gleicher Richtung durchflossen werden (Fig. 44 a), so erkennt man, daß beide Kräfte eine tangentiale

Digitized by Google

Resultierende haben, während bei ungleicher Stromrichtung (Fig. 44 b) eine radiale Resultierende entsteht.

In Fig. 45, welche den in Fig. 20 gezeichneten Anker noch einmal darstellt, sind die Punkte X so gelegen, daß alle gleich weit von ihnen entfernten Leiter von gleich gerichteten Strömen durchflossen werden. Die Punkte N und S dagegen liegen so, daß alle gleich weit entfernten Leiter ungleich gerichtete Ströme führen. In X können also nur tangentiale, in N und S nur radiale Kräfte bestehen. An Stellen, welche zwischen N, S und X gelegen sind, werden also gleichzeitig radiale und tangentiale Kräfte auftreten, doch so, daß die radialen kleiner sind als diejenigen in N und S, und die tangentialen kleiner als diejenigen in X. Da für die Erzeugung einer Triebkraft auf den Anker aber nur die radialen magnetischen Kräfte wirksam sind, so kann die weitere Betrachtung der tangentialen unterbleiben.

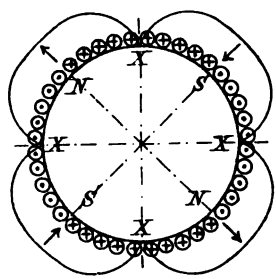


Fig. 45.

Für die radialen Komponenten ergibt sich demnach, da in X Nullwerte und in N und S Maximalwerte auftreten, eine Verteilung, wie sie in Fig. 45 durch die Umfassungskurven in bekannter Art dargestellt ist. Entsprechend den Betrachtungen an Fig. 20 liegen am Orte der Maximalwerte N und S die Bürsten.

Beim Vergleich von Fig. 45 mit Fig. 19, welche die Verteilung des Feldes der äußeren Magnetpole oder des Hauptfeldes für denselben Anker wiedergibt, erkennt man die wichtige Tatsache, daß Hauptfeld und Ankerfeld gegeneinander verschoben sind, und zwar derart, daß die Maximalwerte des einen mit den neutralen Achsen des anderen zusammenfallen. In Fig. 46 sind diese beiden Felder gleichzeitig dargestellt, das Hauptfeld strich-punktiert, das Ankerfeld gestrichelt; die Pfeile bei den Maximalwerten geben die magnetische

Digitized by Google

Kraftrichtung der einzelnen Feldabteilungen an. Da es bei den vorliegenden Betrachtungen nicht auf die spezielle Form der Kraftverteilungskurven ankommt, ist diese hier nur nach zeichnerischen Rücksichten gewählt worden, so daß das Bild möglichst deutlich wird. Addiert man Haupt- und Ankerfeld unter Berücksichtigung ihrer Richtungen, so erhält man ein resultierendes Feld, wie es die

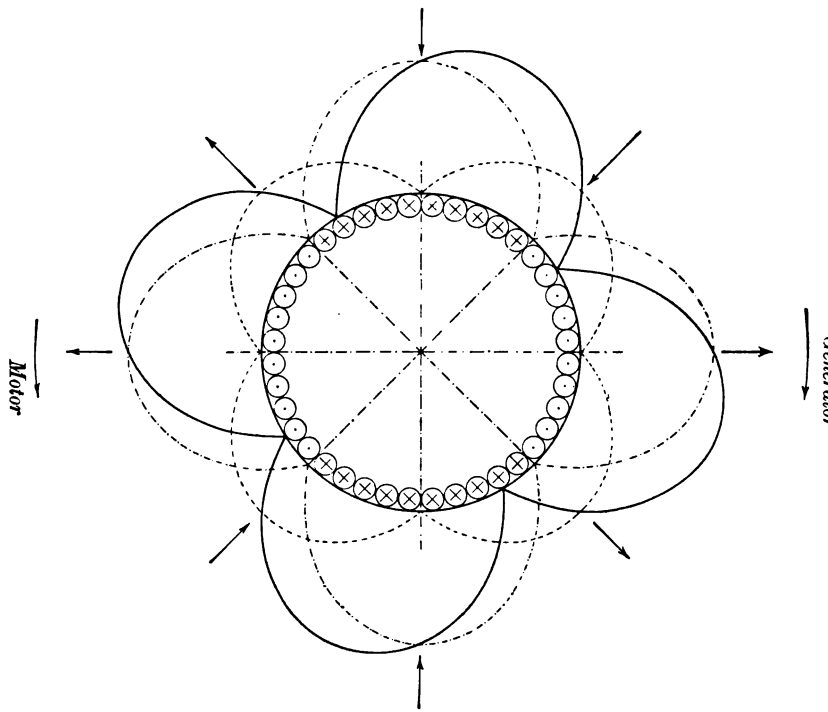


Fig. 46.

ausgezogene Kurve darstellt. Dieses Gesamtfeld ist gegenüber den beiden anderen ebenfalls verschoben und zwar gegenüber dem Hauptfeld im Sinne der Uhrzeigerbewegung. Da aber der Anker in der betrachteten Figur nach der Richtungsregel für die elektromagnetischen Zugkräfte (S. 40) sich in dem Hauptfelde entgegen dem Uhrzeigersinne drehen muß, wenn die Maschine als Motor läuft, im Sinne desselben aber, wenn sie als Generator betrieben

Digitized by Google

wird, so ergibt sich für beide Typen die Regel: Infolge der Magnetisierung des Ankers durch seine eigenen Windungen verschiebt sich das den Anker umgebende Gesamtfeld bei einem Motor entgegen der Ankerdrehung, beim Generator dagegen im Sinne derselben. Man spricht deshalb wohl auch von „Nacheilung“ und „Voreilung“ des resultierenden Feldes; doch sind diese Ausdrücke nicht korrekt, weil alle Felder stillstehen.

Von der Verschiebung des resultierenden Feldes ist am wichtigsten diejenige der neutralen Achsen, da zur Aufrechterhaltung des funkenlosen Ganges die Bürsten mit diesen Achsen zusammen verstellt werden müssen. Nach den Betrachtungen des vorigen Abschnittes muß die Bürstenverstellung sogar noch über die neutralen Linien hinausgehen, beim Motor ebenfalls entgegen und beim Generator mit der Ankerbewegung. Die Ankerrückwirkung also und die speziellen Bedingungen des Funkenlöschens verlangen Bürstenverstellung in gleichem Sinne.

Mit Fig. 46 sind indes die Betrachtungen der Ankerrückwirkung noch nicht zum Abschluß gebracht, denn mit den Bürsten verschieben sich die Stellen des Ankerumfanges, wo die Stromrichtung der achsialen Leiter sich umkehrt (NS in Fig. 45), und damit verschiebt sich auch das ganze Ankerfeld, so daß Fig. 46 nach der Bürstenverstellung keine Gültigkeit mehr hat. Würde man das Ankerfeld in der neuen Lage mit dem alten Hauptfelde in einer und derselben Figur zeichnen und auch hierfür ein resultierendes Feld bilden, so würde dieses noch weiter als vorhin gegen das Hauptfeld verschoben erscheinen, und die Bürsten müßten folgen u. s. f. Die definitive Bürsteneinstellung ergibt sich leicht, wenn man von der speziellen Bedingung des Funkenlöschens in Abschnitt X zunächst noch absieht und annimmt, daß die Bürsten in der neutralen Achse des resultierenden Feldes stehen bleiben können. Will man eine Bürste in diese neutrale Achse bringen, so muß man sie offenbar an diejenige Stelle setzen, wo der Maximalwert des Ankerfeldes, der mit der Bürste wandert, gerade gleich groß und entgegengesetzt gerichtet ist der dort vorhandenen Stärke und Kraftrichtung des Hauptfeldes; denn dann wird an jenem Orte die Kraft des resultierenden Feldes in der Tat gleich Null.

In Fig. 47 ist die hierbei stattfindende Verteilung der drei Kraftfelder längs einer Ankerhälfte in der Abwickelung gezeichnet; die beiden Kraftrichtungen sind durch positive und negative Ordinaten

Digitized by Google

unterschieden. H stellt die Kurve des Hauptfeldes, A die des Ankerfeldes und R als Summe von beiden die Kurve des resultierenden Feldes dar. An die Stelle, wo $A = \pm A_{max}$, ist $H = \mp A_{max}$ und daher $R = 0$; hier haben also die Bürsten zu stehen.

Durch die Notwendigkeit dieser Bürstenverstellung gewinnt die Ankerrückwirkung für den Betrieb von Motoren und Generatoren große Bedeutung. Da die Magnetisierung des Ankers von der Stromstärke desselben abhängt, so müßte, genau genommen, für jede Belastung eine besondere Einstellung der Bürsten erfolgen, wenn funkenloser Gang erreicht werden soll. In Betrieben, wo die Belastungsschwankungen so schnell vor sich gehen, daß dies nicht möglich ist, muß durch Verwendung von Kohlenbürsten die Funken-

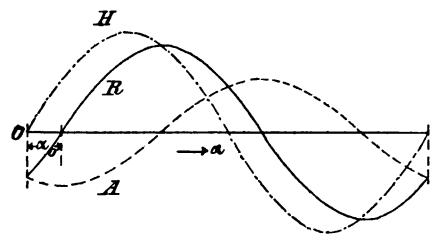


Fig. 47.

bildung herabgedrückt werden. Für Bahnen, Hebezeuge und ähnliche Betriebe werden heutzutage aus diesem Grund ausschließlich Kohlenbürsten benutzt und ein für alle Mal in die neutrale Achse des Hauptfeldes, also in die Mitte zwischen den Polen oder auf geringe „Nacheilung" eingestellt. Bei der elektrischen Bremsung, wo der Motor plötzlich zum Generator gemacht wird, wäre eine besonders große Bürstenverstellung nötig; da diese aber der Natur der Sache nach nicht ausführbar ist, so ist beträchtliche Funkenbildung dabei nie ganz zu vermeiden.

Die magnetischen Verhältnisse, welche durch die Bürstenverstellung geschaffen werden, modifizieren die Betriebseigenschaften der Motoren und Generatoren in gewissem Grade. Als Grundlage für die Betrachtung dieser Änderung hat die Tatsache zu dienen, daß an die Stelle des Hauptfeldes jetzt das resultierende tritt. Die Größe des letzteren läßt sich besonders leicht ableiten, wenn man für einen Augenblick annimmt, daß sowohl A wie auch H (Fig. 47) sich sinusartig um den Ankerumfang verteilen. Setzt man

Digitized by Google

$$H = H_{max} \sin \alpha,$$

indem man α von der neutralen Achse O des Hauptfeldes aus zählt, so gehorcht derjenige Winkel α_o, zu dem der Wert $-A_{max}$ gehört oder bei welchem die neutrale Achse von R liegt, der Gleichung

$$-H_{max} \sin \alpha_o = -A_{max},$$

$$\sin \alpha_o = \frac{A_{max}}{H_{max}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (35)$$

Da auch R als Summe von zwei Sinusfunktionen sinusartig verlaufen muß, so sind nicht nur die neutralen Achsen, sondern auch die Maximalwerte von R und H um α_o gegen einander verschoben. Während H_{max} bei $\alpha = \frac{\pi}{2}$ auftritt, erhält man R_{max} bei $\alpha = \frac{\pi}{2} + \alpha_o$. Da ferner R_{max} mit $A = 0$ zusammenfällt, so hat R_{max} denselben

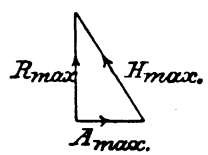


Fig. 48.

Wert wie diejenige Ordinate von H, welche zu $\alpha = \frac{\pi}{2} + \alpha_o$ gehört. Da letztere $= H_{max} \sin \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_o\right)$ ist, so ist auch

$$R_{max} = H_{max} \sin \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_o\right) = H_{max} \cos \alpha_o$$

und mit Benutzung von Gl. 35

$$R_{max} = \sqrt{H_{max}^2 - A_{max}^2}.$$

Der Zusammenhang zwischen den Intensitäten der drei Felder kann also nach Art eines Kräftepoligons durch Fig. 48 dargestellt werden. Da $R_{max} < H_{max}$, so verkleinert die Ankerrückwirkung das Feld, welches zur Erzeugung des Drehmoments zur Verfügung steht.

Nach Feststellung dieser Tatsache für sinusartige Verteilung interessiert die Frage, ob auch für andere Verteilungen eine Verkleinerung der Stärke des Polfeldes durch das Ankerfeld eintritt; eine solche müßte bei der Konstruktion der Motoren und Generatoren berücksichtigt werden, weil sie die Leistung derselben etwas herab-

Digitized by Google

drückte. Zur Beantwortung dieser Frage möge Fig. 49 betrachtet werden, welche einen Anker innerhalb eines vierpoligen Magnetgestelles darstellt. Bei der gezeichneten Strom- und magnetischen Kraftrichtung muß sich der Anker als Motoranker nach der Regel auf S. 40 entgegen dem Uhrzeiger drehen, und die Bürsten müssen daher im Sinne der Uhrzeigerdrehung verstellt werden. In Fig. 49 ist eine Verschiebung bis zum nächsten Polrande angenommen, so daß die Stromrichtung ⊕ gerade vor einem Polrand in die Richtung ⊙ übergeht. Zur Vereinfachung des Bildes sind die Bürsten nicht besonders eingezeichnet.

Die genaue theoretische Erforschung der magnetischen Vorgänge in Fig. 49 ist außerordentlich schwierig; eine exakte rechnerische

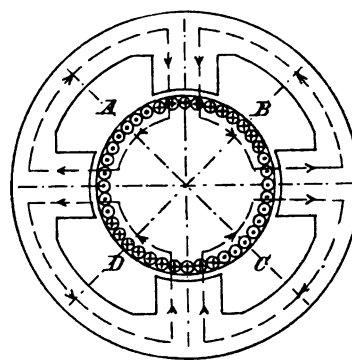


Fig. 49.

Behandlung läßt die heutige Wissenschaft noch nicht zu. Dagegen kann man auf experimentellem Wege die Verteilung der magnetischen Kräfte zwischen Pol und Anker leicht und einfach feststellen. Ein Mittel dazu bietet z. B. die auf S. 18 beschriebene Wismutspirale, welche man in den Luftraum zwischen den Polen und dem stromdurchflossenen Anker einführen kann. Der Anker darf dabei natürlich nicht rotieren, sondern muß festgeklemmt werden.

Eine andere einfache Untersuchungsmethode besteht darin, daß man außer den Hauptbürsten auf dem Kommutator des laufenden Ankers noch zwei Nebenbürsten schleifen läßt, welche gleichzeitig zwei benachbarte Lamellen berühren und, von einander isoliert, auf einem besonderen Bürstenhalter angebracht sind, mit dem zusammen sie langsam verstellt werden können. Setzt man diese Hilfsbürsten

Digitized by Google

mit einem Voltmeter in Verbindung, so mißt man mit Hilfe desselben immer die Spannung E_{p_1} der einzelnen Spulen und, da $E_{p_1} = J w_1 + e_1$ ist, wegen des geringen Wertes des Spannungsabfalles Jw_1 auch die E.M.K. e_1 einer Ankerspule an der Stelle des Magnetfeldes, wo die Berührung der zugehörigen Lamellen mit den Bürsten gerade eintritt. Aus Gl. 29 (S. 56) kann man dann leicht die magnetische Kraft $\mathfrak{B}_r$ an dieser Stelle berechnen; da g und l konstant sind, so ist die Kurve der E.M.K. als Funktion der Winkelstellung in anderem Maßstabe gleichzeitig die Kurve der Verteilung dieser magnetischen Kraft.

In Übereinstimmung mit den früheren Betrachtungen an Fig. 18 (S. 44) findet man experimentell, daß die radiale Kraft $\mathfrak{B}_r$ vor den Magnetpolen annähernd konstant ist, so lange der Anker keinen Strom führt und erst in der Nähe beider Ränder abnimmt. Die „Ankerrückwirkung" bewirkt nun, wie der Versuch weiter zeigt, folgende Abänderung: Sie macht die Verteilung der magnetischen Kraft gegen die Polmitte unsymmetrisch in der Art, daß $\mathfrak{B}_r$ von demjenigen Polrande an, bei dem die Bürsten stehen, nach dem anderen Rande desselben Poles hin zunimmt; der mittlere Wert von $\mathfrak{B}_r$, also auch die ganze Polstärke N wird dabei kleiner, als sie bei derselben Ampèrewindungszahl der Magnetspulen ohne Ankerstrom sein würde. Das vorher für sinusartige Feldverteilung gefundene Resultat $R_{max} < H_{max}$ hat also Allgemeingültigkeit.

Da die Verkleinerung von N die Leistungsfähigkeit der Motoren und Generatoren herabdrückt, so muß nach einem einfachen Mittel gesucht werden, diese Abnahme von N rechnerisch wenigstens annähernd festzustellen. Man pflegt zu diesem Zwecke die Ankerwindungen nach dem Vorgange von Esson in zwei Abteilungen zerlegt zu denken, von denen die eine diejenigen umfaßt, die zwischen je zwei Polen liegen (A, B, C, D in Fig. 49), und die andere diejenigen, welche sich vor den Polen befinden. Die ersteren bilden die wesentliche Ursache für die Verringerung der Polstärke und heißen deshalb „Gegenwindungen", die letzteren heißen „Querwindungen".

Die Wirkung der Gegenwindungen kann man sich in folgender Weise erklären. Angenommen, jede der vier Gruppen A, B, C, D umfasse n_g Drähte. Denkt man sich dann jede dieser Gruppen noch in zwei Teile geteilt und betrachtet man z. B. die halben Gruppen von A und B, welche neben dem obersten Pole liegen, so ergibt sich Folgendes: Diese Drähte können betrachtet werden als

Digitized by Google

gehörig zu einer flachen, rechteckigen Spule, deren Achse mit der Polachse zusammenfällt und die, von unten gesehen, von einem Strome im Sinne des Uhrzeigers durchflossen wird. Da diese Spule $\frac{n_g}{2}$ Windungen umfaßt, so würde bei einer Stromstärke von i in jedem ihrer Drähte die Ampèrewindungszahl $\frac{n_g i}{2}$ in ihr wirken. Die Richtung der von ihr erzeugten Kraftlinien ist zu bestimmen durch die auf S. 20 gegebene Regel, wonach ein Beschauer in der Richtung dieser Linien blickt, der, längs der Spulenachse schauend, den Strom im Sinne des Uhrzeigers fließen sieht. Danach würde die magnetische Kraft dieser Spule von unten nach oben, also entgegen den eingezeichneten Kraftlinien der Magnetschenkel gerichtet sein. Ein Gleiches gilt auch für die anderen Windungen, welche neben den übrigen Polen liegen, auch diese sind „Gegenwindungen". Um die Wirkung derselben zu kompensieren, muß also die Ampèrewindungszahl einer jeden Erregerspule der Magnetschenkel um $\frac{n_g i}{2}$ gegenüber demjenigen Werte vergrößert werden, welcher sich aus den früher besprochenen Berechnungsmethoden (S. 23—30) ergibt[1]).

Um nun auch die Wirkung der Querwindungen zu erkennen, braucht man nur alle ihre Drähte einzeln zu betrachten. Von der unterhalb des obersten Poles liegenden Drahtgruppe z. B. würde jeder Draht magnetische Kräfte erzeugen, welche in freier Luft den Draht kreisförmig und im Sinne des Uhrzeigers verlaufend umgeben. Die Nachbarschaft der eisernen Pole ändert zwar die Kreisform im einzelnen ab, als allgemeines Merkmal bleibt aber bestehen, daß die magnetische Kraft eines jeden Drahtes im Luftraum zwischen dem Anker und jenem

---

[1]) Gl. 11 (S. 26) gibt als nJ die Anzahl Ampèrewindungen für einen ganzen magnetischen Kreis, also für zwei Magnetschenkel. Da die Korrektion für jeden Magnetschenkel $\frac{n_g i}{2}$ beträgt, so ist nJ um $n_g i$ zu korrigieren. Es muß übrigens besonders beachtet werden, daß i nur den Strom in einem Ankerdrahte, nicht aber den gesamten Strom bedeutet, welcher dem Anker zugeführt oder entnommen wird. Bei Ankern mit Parallelschaltung ist also $i = \frac{J_a}{2p}$, bei Ankern mit Reihenschaltung $i = \frac{J_a}{2}$ zu setzen.

Digitized by Google

Pole links vom Drahte von unten nach oben und rechts von oben nach unten wirkt. Am linken Polrande erzeugen also alle Drähte Kräfte, die entgegen dem Hauptfelde verlaufen, am rechten Rande aber solche, die ebenso wie das Hauptfeld gerichtet sind. In der Mitte endlich heben die sich Wirkungen der auf beiden Seiten gelegenen Querdrähte auf. Das resultierende Feld muß daher, selbst wenn das Hauptfeld über die ganze Polausdehnung konstante Kräfte gibt, ungleichförmig sein und vom linken zum rechten Polrande an Intensität zunehmen. Allgemein findet man auch bei der Betrachtung der übrigen Pole, daß die Feldstärke stets an denjenigen Rändern am kleinsten ist, nach welchen hin die Bürsten verschoben werden mußten, und nach dem anderen Rande hin wächst. Dieses Verhalten ist von Wichtigkeit im Zusammenhang mit der im Abschnitt X gefundenen Tatsache, daß zur Herstellung der Funkenlosigkeit eine bestimmte Feldstärke an der Stelle des Spulenkurzschlusses vorhanden sein muß. Der Konstrukteur muß also darauf bedacht sein, zu erreichen, daß die resultierende Feldstärke durch die Querwindungen einseitig nicht zu sehr verkleinert wird. Die weitere Verfolgung dieses Gegenstandes liegt indes außerhalb des Zweckes der vorliegenden Darstellung.

Digitized by Google

XII. Wirbelströme und Hysteresis.

Zu den Arbeitsverlusten in den Anker- und Schenkelwickelungen der elektrischen Maschinen, die allgemein durch den Ausdruck J^2w bestimmt sind, können noch andere Verluste elektrischer und magnetischer Natur hinzutreten, welche bei mangelhaften Konstruktionen sehr erhebliche Werte annehmen können. Diese Verluste haben nicht nur durch ihren Einfluß auf den Wirkungsgrad ökonomische Bedeutung, sondern können auch deswegen, weil sich die verlorene Arbeit in Wärme umsetzt, in betriebstechnischer Hinsicht großen Schaden stiften. Ihre Ursachen sind die „Wirbelströme“ und die magnetische „Hysteresis“. Im folgenden wird eine wissenschaftlich erschöpfende Darstellung dieser Vorgänge nicht beabsichtigt, sondern nur eine Besprechung ihrer Grundlagen und der sich daraus ergebenden Mittel für ihre Beschränkung.

Die Wirbelströme.

Auf S. 56 ist festgestellt worden, daß in jedem äußeren achsialen Leiter einer rotierenden Ankerwickelung eine E.M.K. induziert wird von der Größe

$$e_1 = \mathfrak{B}_r \, g \, l .$$

Diese Formel gilt ganz allgemein für einen beliebigen um eine Achse mit der absoluten Geschwindigkeit g rotierenden und parallel zu dieser Achse liegenden Leiter l, wenn die radiale magnetische Kraft an dem Orte, an welchem er sich gerade befindet, $\mathfrak{B}_r$ ist. Da nun die magnetischen Kraftlinien auch das Innere des Ankers durchsetzen, so müssen auch in den Eisenmassen desselben elektromotorische Kräfte erzeugt werden. Um die Größe und Verteilung dieser Kräfte zu bestimmen, müßte man sich das ganze Ankerfleisch in lauter unendlich dünne achsiale Adern von der Länge l zerlegt denken, jede Ader als achsialen Leiter behandeln und die in ihr induzierte E.M.K. nach

Digitized by Google.

obiger Gleichung berechnen. Diese Rechnung wäre für die ganzen elektrischen Vorgänge im Ankereisen erschöpfend, denn die achsialen elektromotorischen Kräfte sind die einzigen, welche auftreten; radiale oder tangentiale werden nicht induziert, wie auf S. 56 nachgewiesen ist.

Da jeder der achsialen Leiter bei der Rotation eine Cylinderfläche beschreibt, so ist es natürlich zweckmäßig, alle diejenigen Adern gleichzeitig ins Auge zu fassen, welche einer und derselben Cylinderfläche angehören; denn für diese ist die absolute Geschwindigkeit g die gleiche, und die Verteilung der E.M.K. längs des Cylinderumfanges hängt nur von $\mathfrak{B}_r$ ab.

Die Verteilung der radialen magnetischen Kräfte $\mathfrak{B}_r$ im Innern des Ankers ist allerdings sehr schwer zu bestimmen, selbst wenn sie für den äußeren Ankerumfang durch ein Diagramm wie in Fig. 19 (S. 45) bekannt ist. Die Schwierigkeit liegt darin, daß die Kraftlinien im Anker nicht radial weiter verlaufen, wie sie eingetreten sind (Fig. 8 und 9), und daher auch die radialen Komponenten der magnetischen Kräfte sich im Innern ändern. Mit Sicherheit läßt sich aber behaupten, daß auch im Ankereisen an denjenigen Teilen, die Nord- und Südpolen gegenüberstehen, die Kräfte $\mathfrak{B}_r$ entgegengesetzte Richtung haben und daß dazwischen neutrale Achsen liegen. Wenn auch nicht in den Einzelheiten der Form, die für die vorliegenden Betrachtungen nur unwesentlich sind, so gelten die Kurven in Fig. 19 doch wenigstens ihrem allgemeinen Charakter nach auch für jeden unendlich dünnen Cylinder im Innern des Ankers, der mit der äußeren Oberfläche des letzteren eine gemeinschaftliche Achse hat. Mit jener Einschränkung stellen also die Kurven in Fig. 19 schließlich auch die Verteilung der achsialen E.M.K. längs dieser Cylinderoberfläche dar.

Die elektrischen Bewegungsvorgänge, welche dadurch im Anker entstehen, kann man am leichtesten überblicken, wenn man eine hydraulische Analogie betrachtet. Statt des Ankers denke man sich eine hohle Trommel von gleicher Größe mit Wasser gefüllt und die ganze Wassermasse zerlegt in lauter achsiale Röhrchen, in denen eine Pressung $e_1 = \mathfrak{B}_r\, g\, l$ bestehe. Da die Länge l aller dieser Röhrchen dieselbe ist, muß die Bewegung der Wasserteilchen offenbar davon abhängen, wie $\mathfrak{B}_r$ und g sich räumlich und zeitlich ändern. Es ist zweckmäßig, die Trommel dabei als feststehend zu betrachten, also von der kinematischen Umkehrung des elektrischen Vorganges aus-

Digitized by Google

zugehen und den Anker als ruhend, das magnetische Feld aber als rotierend anzunehmen.

Die ganze Wassermasse besteht dann aus lauter konzentrisch in einander geschobenen unendlich dünnen Cylindern, in deren achsialen Adern der achsiale Druck sich zeitlich ändert wie die Radiivektoren der Kurve $\mathfrak{B}_r$ in Fig. 19. Diese Kurve stellt die räumliche Verteilung des Druckes längs der Cylinderperipherie in jedem Augenblick dar; ihre Rotation ergibt daher die zeitlichen Änderungen in jeder Ader. Die Pressungen in allen einzelnen Adern ändern also periodisch ihre Größe und ihre Richtung. Bezeichnet man den jeweilig vorhandenen Druckzustand als eine „Phase" der periodischen Änderung, so sind die Druckzustände der verschiedenen Adern in der Phase gegen einander verschoben, oder gleiche Druckzustände treten in benachbarten Adern nicht gleichzeitig, sondern nach einander ein. Nimmt man hinzu, daß die absoluten Größen, welche die Pressungen dabei erreichen, in den inneren Cylindern kleiner sind als in den äußeren, weil g geringer ist, so erkennt man, daß die periodischen Druckänderungen in der ganzen Wassermasse von außerordentlich verwickelter Natur sind. Als Folge davon müssen überaus komplizierte hin- und hergehende Bewegungen der Wasserteilchen auftreten, welche bei dem elektrischen Vorgange als Wirbelströme bezeichnet werden. Die exakte Feststellung des Verlaufes derselben würde selbst bei genauer Kenntnis der magnetischen Kraftverteilung auch im Innern des Ankers zu den schwierigsten Problemen der Mathematik gehören und nur mit partiellen Differentialgleichungen höherer Ordnung möglich sein. Die vorangehende Darstellung der grundlegenden Verhältnisse zeigt aber, daß es Mittel gibt, der Entstehung solcher Wirbelströme entgegenzuwirken.

Im hydraulischen Analogon könnte man die Wirbelbewegung der Wasserteilchen dadurch unterbinden, daß man entweder durch eine große Anzahl senkrecht zur Achse gestellter Zwischenwände die Trommel in lauter kleine Zellen unterteilte und dadurch die Bewegung der Wasserteilchen längs der Kraftrichtung abschnitte, oder indem man den inneren Raum mit vielen achsial gelegten Röhrchen durchzöge, sodaß jede „Ader" von einem besonderen Röhrchen eingeschlossen würde und ein Ausgleich der Druckdifferenzen gegenüber den Nachbaradern nicht stattfinden könnte. Das erstere Verfahren bestände im elektrischen Falle in der Zusammensetzung des Ankers aus lauter senkrecht zur Achse gestellten, von einander

Digitized by Google

isolierten Eisenblechen, der zweite in der Herstellung aus achsial liegenden isolierten Eisendrähten. Da die erstere Lösung des Problems konstruktiv einfacher ist, so wird sie heutzutage allgemein angewendet. Die Isolation der einzelnen Bleche geschieht dabei entweder durch dünne Papiereinlagen oder durch einen einfachen Anstrich; den Raumverlust rechnet man bei jenen zu 10—15%, bei diesem zu 5—10%. Die Blechdicke soll bei Gleichstrom-Ankern 1,5 mm nicht übersteigen.

Es ist zu bemerken, daß durch die Zerlegung in Bleche der Verlauf der Kraftlinien im Anker nicht behindert wird. Da die Kraftlinien nämlich nach S. 43 achsiale Komponenten nicht besitzen, also nur in den Ebenen der Bleche verlaufen, so haben sie die kleinen Zwischenräume zwischen den Blechen überhaupt nicht zu überbrücken. Würde man dagegen den Ankerkörper aus achsialen Drähten zusammensetzen, so müßten die Kraftlinien von einem Draht zum andern übergehen, und der magnetische Widerstand würde durch die Zwischenräume wesentlich erhöht werden.

Die Notwendigkeit der Unterteilung kann auch bei der Kupferbewickelung des Ankers auftreten, wenn die letztere für starke Ströme bestimmt ist, und daher dicke Drähte benutzt werden müssen. Denkt man sich zunächst die Wickelung nicht aus einzelnen Drähten oder Kupferbändern zusammengesetzt, sondern aus einem kompakten Kupfermantel bestehend, so entstehen darin Wirbelströme, wie in den dünnen Eisencylindern, aus denen wir uns vorher den Eisenkörper zusammengesetzt dachten. Aber auch in einem achsialen Draht von endlichen Dimensionen müssen Wirbelströme auftreten, da in den einzelnen unendlich dünnen Adern in jedem Augenblicke verschiedene Drucke bestehen. Um diese Ströme herabzudrücken, darf natürlich eine Unterteilung der Drähte in achsialer Richtung nicht geschehen, da sonst dem gesamten Triebstrom des Elektromotors oder dem nach außen zu liefernden Strom des Generators im Anker der Weg abgeschnitten würde. Man muß daher zu dem oben an zweiter Stelle genannten Mittel greifen und den dicken Draht aus dünneren, parallel gelegten Drahtadern zusammensetzen. Hier kann natürlich diese Art der Unterteilung den Verlauf der Kraftlinien nicht hemmen; denn die isolierenden Zwischenräume zwischen den Kupferdrähten haben denselben magnetischen Widerstand, als wenn sie aus dem ebenfalls unmagnetisierbaren Kupfer beständen.

Digitized by Google

Die Hysteresis.

Bei der Rotation des Ankers im magnetischen Felde der Pole wird jedes Teilchen des Ankers fortwährend ummagnetisiert. Man erkennt dies leicht z. B. an Fig. 49 S. 120. Von dem Anker, welcher in dieser Figur dargestellt ist, möge ein Teilchen betrachtet werden, welches bei der Drahtabteilung *A* im Innern gerade dort gelegen ist, wo der Pfeil die Richtung der magnetischen Kraft andeutet. Wenn dieses Teilchen ein unendlich dünnes und kurzes Eisenstäbchen ist, dessen Achse gerade in der Richtung der magnetischen Kraft liegt, so gibt der Pfeil die Richtung an, in welcher dasselbe von einem unendlich dünnen Kraftlinienbüschel durchströmt wird. Dieser Kraftlinienfluß macht das Stäbchen zu einem Magnet, dessen Südpol dort liegt, wo die Kraft linien in seine Endfläche eintreten, und dessen Nordpol sich da befindet, wo sie wieder austreten. Wenn der Anker sich nun in der Uhrzeigerrichtung dreht, bis das Teilchen bei *B* angekommen ist, so lehrt die Figur, daß die Kraftlinien gerade in umgekehrter Richtung durch dasselbe hindurchgehen wie früher. Nordpol und Südpol vertauschen sich also und das Stäbchen wird ummagnetisiert. Geschieht die Drehung weiter, bis nach *C*, so wird die alte Magnetisierung wie bei *A* wieder hergestellt, und das Teilchen hat einen vollständigen „Kreisprozeß“ durchgemacht. Ganz Entsprechendes gilt auch für alle anderen Teilchen des Ankers.

Für eine solche doppelte Ummagnetisierung ist aber in allen Fällen ein Arbeitsaufwand notwendig, unter welchen besonderen Verhältnissen man den Kreisprozeß auch durchlaufe. Ohne auf die spezielle Theorie des Gegenstandes und insbesondere auf die Berechnung der Größe dieser Arbeitsmenge näher einzugehen, kann man die Begründung schon ganz allgemein aus der Erscheinung der Remanenz ableiten. Um mit möglichst einfachen Vorstellungen zu arbeiten, wollen wir einen Eisenstab betrachten, welcher durch Strom in einer darüber geschobenen Spule magnetisiert sein möge. Wenn man diesen Strom unterbricht, so hört bekanntlich die Magnetisierung nicht völlig auf, sondern vermindert sich nur bis auf einen bestimmten Wert, den sie beibehält. Um diesen remanenten Magnetismus völlig zu zerstören und das Eisen wieder ganz zu entmagnetisieren, bedarf es in der Spule eines Stromes, also einer magnetisierenden

Digitized by Google

Kraft in umgekehrter Richtung. Nach dem Prinzip der Wirkung und Gegenwirkung muß angenommen werden, daß dieser Kraft eine gleiche, aber entgegengesetzte Kraft im Eisen gegenübersteht, welche überwunden werden mußte. Diese Kraft wird als die Koërzitivkraft des Eisens bezeichnet. Die ganze Erscheinung, welche sich in dieser Kraft und in der Remanenz verkörpert, heißt die Hysteresis[1]). Nach völliger Entmagnetisierung bekommt man bei weiterer Steigerung der Stromstärke im negativen Sinne auch eine Umkehrung des Magnetismus und erhält schließlich, wenn die Stromstärke den Ausgangswert in negativer Richtung erreicht hat, auch den Ausgangswert der magnetischen Induktion $\mathfrak{B}$ im negativen Sinne.

Nach den Erörterungen auf S. 29 bedeutet nun die Magnetisierung eine Anhäufung von potentieller Energie. Der obige Satz, daß die völlige Umkehrung des Stromes auch zu völliger Umkehr der Magnetisierung führt, besagt also, daß in beiden Fällen gleiche potentielle Energie in verschiedenem Sinne vorhanden ist. Da nun bei der Unterbrechung des ersten Stromes die Magnetisierung und damit auch die potentielle Energie nicht völlig aufgehört hat, so muß sie durch einen besonderen äußeren Energieaufwand zerstört werden, ehe sie den entgegengesetzten Betrag ihres Anfangswertes erreichen kann. Dieser äußere Energieaufwand bedeutet die eigentliche Ummagnetisierungsarbeit, er findet sein Äquivalent in einer Erwärmung des Eisens.

Bei Gleichstromankern ist der Magnetisierungsvorgang im Einzelnen verwickelter als bei dem soeben betrachteten Stabe, weil die Kraftlinien bei den verschiedenen Stellungen in ein und demselben Teilchen sich nicht parallel bleiben. Die obigen Schlußfolgerungen bleiben aber auch hier gültig, da sie nur aus der allgemeinen Eigenschaft der Hysteresis gezogen worden sind. Da die Hysteresis aber eine innere Eigentümlichkeit aller Eisensorten ist, so läßt sich die Arbeit der Ummagnetisierung nur durch Wahl von Materialien herunterdrücken, welche wenig Hysteresis zeigen, nie aber ganz vermeiden oder durch Unterteilung der Eisenkörper vermindern. Aus diesem Grunde sollen die Anker der elektrischen Maschinen nur aus bestem und weichstem Schmiedeisen hergestellt werden.

[1]) von ὑστερέω zurückbleiben (der Änderung der Magnetisierung gegenüber der Änderung der magnetisierenden Kraft).

Digitized by Google

Anhang.

Das absolute Maſs-System.

Im ersten Abschnitte dieses Buches sind die elektrischen Einheiten Ampère, Ohm, Volt und Watt nur äußerlich definiert worden durch das Verfahren ihrer Herstellung und Messung, ohne daß die Wahl gerade dieser Einheitswerte näher begründet wurde. Im Verlaufe der Betrachtungen traten deshalb bei der Umrechnung der elektrischen und magnetischen Größen in die gewohnten mechanischen Größen, Kraft und Arbeit, Übergangsfaktoren auf, die nur angegeben, aber nicht berechnet werden konnten. Da die rechnerische Feststellung dieser Faktoren sich naturgemäß nur auf einer scharfen wissenschaftlichen Definition der elektrischen Einheiten aufbauen kann, so möge eine solche an dieser Stelle noch als Ergänzung gegeben werden.

Wie schon im ersten Abschnitte hervorgehoben wurde, kann die Wahl der elektrischen Einheiten zunächst ganz beliebig sein. So benutzte man z. B. in früheren Jahren ein sehr bequemes und ziemlich konstantes galvanisches Element, das Daniellsche, zur Definition der Einheit der E.M.K. Dieses Element, das eine positive Elektrode aus Kupfer und eine negative aus Zink enthält, die in Kupfervitriol oder in Zinkvitriol oder Schwefelsäure stehen, wurde und wird noch heute in physikalischen Laboratorien sehr gern für galvanische Versuche verwendet. Es lag also nahe, seine E.M.K. als Vergleichsmaßstab für alle anderen vorhandenen Stromquellen zu benutzen und die E.M.K. der letzteren einfach in „Daniell“ auszudrücken. Nachdem dann Werner Siemens eine Quecksilbersäule von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt als Widerstandseinheit vorgeschlagen und Reproduktionen dieser Einheit an alle größeren Laboratorien verschickt hatte, war durch das Ohmsche Gesetz zugleich auch

Digitized by Google

eine Einheit der Stromstärke definiert, nämlich diejenige, welche ein „Daniell" zu erzeugen vermag, wenn es durch ein „Siemens" geschlossen wird. Diese Stromeinheit hieß denn auch in der Tat ein Daniell/Siemens. Neben diesen Einheiten war aber in früheren Jahren noch eine ganze Reihe anderer in Benutzung, mehrfach sogar verschieden definierte unter gleichem Namen, so daß die Unsicherheit auf dem Gebiete des elektrischen Messens dem Wirrwarr der verschiedenen Gewichts- und Raum-Maßsysteme der einzelnen Völker und Völkchen nichts nachgab. Die absolute Einigkeit, welche in der Definition der elektrischen und magnetischen Einheiten dagegen jetzt besteht, die internationale Annahme eines Systems, das sich auf allgemein anerkannter wissenschaftlicher Grundlage aufbaut und zugleich den Namen von bedeutenden Männern des Faches ohne Rücksicht auf ihre Nationalität ein bleibendes Denkmal setzt, kann als eine Kulturerrungenschaft ersten Ranges betrachtet werden, die an Wert noch steigt, wenn man bedenkt, daß sogar dem Dezimalsystem für Maß und Gewicht noch heute manches Tor verschlossen ist.

Das Wesen des heutigen Systems ist, wie bereits im ersten Abschnitte erwähnt wurde, die Zurückführung der zu definierenden abstrakten Einheiten auf diejenige der bekannten mechanischen Einheiten unter Benutzung von Naturgesetzen, welche die Beziehung der elektrischen und magnetischen Größen mit den mechanischen zum Ausdruck bringen. Für den vorliegenden Zweck erscheint es angebracht, bei der Verfolgung dieses Gedankenweges von den üblichen technischen Einheiten, nämlich dem Kilogramm, dem Meter und dem Kilogrammmeter auszugehen. Es möge indes sogleich vorausgeschickt werden, daß die Erklärung, welche an dieser Stelle zu geben möglich ist, nur rein abstrakter Natur sein kann.

Hält man das Kilogramm als Krafteinheit und das Meter als Längeneinheit fest, so erhält man durch das Grundgesetz der magnetischen Kräfte (Gl. 9, S. 12) zunächst eine Einheit für die magnetische Masse. Nach der Gleichung

$$F = \frac{m^2}{r^2}$$

muß diejenige Masse m als die Einheit bezeichnet werden, welche auf eine gleiche Masse in der Entfernung von $r = 1$ m eine Kraft von $F = 1$ kg ausübt. Hieraus ergibt sich aber sogleich auch die

Digitized by Google

Einheit für die magnetische Feldstärke $\mathfrak{B}$, welche wir als die Kraft auf eine Masseneinheit an einer beliebigen Stelle des Feldes definierten. $\mathfrak{B}$ ist offenbar dort gleich eins, wo die vorhin definierte Masseneinheit die Kraft von 1 kg erfährt.

Mit Hilfe des Grundgesetzes für die elektromagnetischen Kräfte, welches auf S. 42 für einen endlichen Leiter auf die Form

$$Z = \mathfrak{B}_r i l$$

gebracht wurde, erhält man dann ohne weiteres die Einheit der Stromstärke i. Dies ist offenbar derjenige Strom, welcher in einem geraden Leiter von $l = 1$ m Länge vorhanden sein muss, damit dieser Leiter in einem konstanten Magnetfelde von der Stärke $\mathfrak{B} = 1$ und von senkrecht zu seiner eigenen Achse wirkender Kraftrichtung eine Zugkraft $Z = 1$ kg erfährt. Hieraus ergibt sich dann aber auch die Einheit der E.M.K., wenn man bedenkt, daß die Arbeit, welche sekundlich in einem geschlossenen Stromkreise von der E.M.K. e bei der Stromstärke i geleistet wird, $= e \,.\, i$ und daß die während t Sekunden geleistete Gesamtarbeit

$$A = e \,.\, i \,.\, t$$

ist. Die Einheit von e ist danach diejenige E.M.K., welche in einem Kreise, in welchem sie die vorhin definierte Einheit der Stromstärke $i = 1$ erzeugt, während einer Sekunde ($t = 1$) eine Arbeit von $A = 1$ kgm leistet. Und schließlich ist nach dem Ohmschen Gesetze

$$w = \frac{e}{i}$$

die Einheit des Widerstandes derjenige Widerstand, welcher in einem Stromkreise vorhanden ist, wenn in ihm die E.M.K. $e = 1$ eine Stromstärke $i = 1$ herstellt.

Würde man die elektrischen und magnetischen Meßinstrumente so einrichten, daß sie die Größen in diesen Einheiten mäßen, so würde umgekehrt die Einführung der gemessenen Größen in die Gleichungen für Z und für A die elektromagnetische Zugkraft von Gleichstromankern und die Arbeit des elektrischen Stromes direkt in kg und kgm ergeben.

Die geschilderte Definitionsweise wäre danach sicherlich die einfachste und im Zusammenhang mit der technischen Verwendung des Stromes auch die natürlichste. Trotzdem hat man sie mehr aus einem geistigen als aus einem praktischen Bedürfnis nicht gewählt.

Digitized by Google

Der Grund dafür liegt in der interessanten Erkenntnis, daß man sämtliche physikalischen Größen durch 3 Grundeinheiten ausdrücken kann: nämlich durch diejenigen der Länge, Masse und Zeit, und daß es dadurch möglich wird, ein einheitliches Maßsystem für alle Quantitäten zu schaffen, mit denen die exakten Wissenschaften zu rechnen haben. Man nennt dieses „das absolute Maßsystem". Jene als Ausgang dienenden, grundlegenden Einheiten sind nach der jetzigen internationalen Konvention das Centimeter, das Gramm und die Sekunde, weshalb man auch als abgekürztes Symbol die Bezeichnung (c g s)-System benutzt.

Um nun die elektrischen und magnetischen Einheiten in diesem neuen Maßsystem auszudrücken, ist es nur nötig, die obigen Betrachtungen unverändert zu wiederholen und dabei nur die als Grundlage benutzten technischen Einheiten kg, m und kgm durch die entsprechenden absoluten zu ersetzen. Da also der Unterschied des neuen Maßsystems von dem vorhin aufgestellten nur durch den Unterschied der absoluten und der technischen Kraft- und Arbeitseinheit gegeben ist, so wäre das Verhältnis der letzteren zu einander zunächst noch zu berechnen.

Im absoluten Maßsystem versteht man unter der Einheit der Kraft diejenige, welche der Masse von 1 g in der Sekunde die Beschleunigung von 1 cm erteilt, und nennt diese Kraft, wie bereits im Abschnitt II (S. 13) erwähnt wurde, eine „Dyne". Im technischen Maßsystem dagegen bedeutet 1 kg den Gravitationsdruck der Masse von 1 kg auf die Unterlage oder die Kraft, mit der sie von der Erde angezogen wird. Da die Masse von 1 kg 1000 mal so groß ist wie diejenige von 1 g und die Beschleunigung, welche ihr die Erdkraft erteilt, 981 cm beträgt, so ist

$$1\text{ kg} = 981\,000 = 9{,}81 \cdot 10^5 \text{ Dynen}.$$

Unter der absoluten Einheit der Arbeit versteht man ferner diejenige, welche von der Kraft einer Dyne geleistet wird, wenn diese einen Körper über einen Weg von 1 cm wegbewegt; diese Arbeitseinheit heißt ein „Erg". Da andererseits bei der technischen Einheit der mechanischen Arbeit als die Einheit des Weges 1 m = 100 cm angenommen wird, so ist

$$1\text{ kgm} = 981\,000 \cdot 100 = 9{,}81 \cdot 10^7 \text{ Erg} \quad . \quad . \quad . \quad (36)$$

Denkt man sich nun die Einheiten von $\mathfrak{B}$, i, e und w jetzt durch die Dyne, das Centimeter und das Erg, wie früher durch kg,

Digitized by Google

m und kgm ausgedrückt und wieder Instrumente gebaut, welche die Messung in diesen neuen Einheiten gestatten, so muß die Einsetzung der damit gemessenen Größen in die Formeln für Z und A die Zugkraft und Arbeit des Stromes auch in Dynen und Erg ergeben. Da es aber für technische Aufgaben wünschenswert ist, diese Resultate in kg und kgm zu erhalten, so müssen die oben berechneten Übergangsfaktoren in die Formeln eingeführt werden, und man erhält

$$Z = \frac{1}{9{,}81 \cdot 10^5} \mathfrak{B}_r i l \text{ kg}$$

$$= 1{,}019 \cdot 10^{-6} \mathfrak{B}_r i l \text{ kg}$$

und

$$A = \frac{1}{9{,}81 \cdot 10^7} e i t \text{ kgm}$$

$$= 1{,}019 \cdot 10^{-8} e i t \text{ kgm}.$$

Ganz dieselben Übergangsfaktoren sind natürlich auch bei allen anderen früher aufgestellten Formeln für elektromagnetische Zugkraft und Arbeit des Stromes einzuführen, wenn darin die elektrischen und magnetischen Größen in absoluten Einheiten ausgedrückt sind. So ergibt sich z. B. für das Drehmoment der Gleichstrommotoren

$$D = 1{,}019 \cdot 10^{-8} \frac{N n J}{2 \pi} \text{ kgm}.$$

Das international festgelegte Maßsystem verwendet nun die absoluten Einheiten in unveränderter Form nur für die magnetischen Größen; für die elektrischen Größen wäre seine direkte Benutzung deswegen unpraktisch, weil insbesondere die in der Technik verwendeten Spannungen, in absoluten Einheiten ausgedrückt, als zu hohe Zahlen erscheinen würden. Die absolute Spannungseinheit ist viel zu klein, und man setzt deshalb die technische Einheit

$$1 \text{ Volt} = 10^8 \text{ absolute Einheiten}.$$

Ferner wird gesetzt die technische Einheit

$$1 \text{ Amp.} = 0{,}1 \text{ absolute Einheiten}$$

und deshalb

$$1 \text{ Ohm} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Amp.}} = 10^9 \text{ absolute Einheiten}$$

und

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Volt} \cdot 1 \text{ Amp.} = 10^7 \text{ absolute Einheiten} = 10^7 \text{ Erg}.$$

Digitized by Google

Die letzte dieser Gleichungen liefert zugleich die Beziehung zwischen kgm und Watt oder zwischen Pferdestärke und Watt. Man erhält nämlich unter Berücksichtigung von Gl. 36

$$1 \text{ kgm} = 9{,}81 \text{ Watt}$$

und

$$1 \text{ P.S.} = 75 \cdot 9{,}81 = 736 \text{ Watt.}$$

Bedenkt man andererseits, daß nach einem bekannten Satze der Wärmemechanik

$$1 \text{ kg cal} = 424 \text{ kgm}$$

ist, so erkennt man, daß

$$1 \text{ g cal} = 4{,}16 \text{ Watt}$$

und

$$1 \text{ Watt} = 0{,}240 \text{ g cal}$$

gesetzt werden kann.

In die Formeln für Z, A und D kommt natürlich ein neuer Übergangsfaktor hinein, wenn darin i und e in Ampère und Volt statt in absoluten Einheiten eingesetzt werden sollen. Da z. B. das Ampère 10 mal so klein ist wie die absolute Einheit der Stromstärke, so erscheint ein und derselbe Strom in Ampère durch eine 10 mal so große Zahl ausgedrückt wie in absoluten Einheiten. Würde man also z. B. den in Ampère ausgedrückten Strom direkt in die Gleichung für Z einsetzen, so würde man einen 10 fach zu großen Wert erhalten, und man muß daher noch mit 0,1 multiplizieren. Demnach wird — wenn $\mathfrak{B}_r$ und N in Dynen und l in cm ausgedrückt bleiben —

$$Z = 1{,}019 \cdot 10^{-7}\, \mathfrak{B}_r\, i\, l \text{ kg}$$

und

$$D = \frac{1{,}019 \cdot 10^{-9}}{2\pi} N n J \text{ kgm}$$

$$= 1{,}612 \cdot 10^{-10} N n J \text{ kgm.}$$

Damit sind alle Übergangsfaktoren ausgedrückt, welche in den Betrachtungen der früheren Abschnitte vorkommen.

Nach der Aufstellung der angegebenen abstrakten Definitionen für die elektrischen Einheiten war es Aufgabe der Physik, die letzteren auch praktisch zu reproduzieren, so daß die Eichung technischer Instrumente auf dieser Grundlage ausgeführt werden konnte. Zur Lösung dieser Aufgabe hat es mehr als anderthalb Jahrzehnte fein-

Digitized by Google

ster wissenschaftlicher Experimentalarbeit bedurft, bis die Übereinstimmung unter den Ergebnissen der verschiedenen Forscher erreicht war, welche der im Abschnitt I wiedergegebenen gesetzlichen Definition zu Grunde gelegt werden konnte. Die Methoden, welche dabei benutzt wurden, bieten rein physikalisches Interesse und liegen nicht nur fern von dem Zwecke dieses Buches, sondern auch weit ab von dem speziellen Interessenkreise des Elektrotechnikers.

Buchdruckerei von Gustav Schade (Otto Franke) Berlin N.

Digitized by Google

Digitized by Google

B89089712475
B89089712475A

Digitized by Google

G.E.STECHERT
NEW YORK

Digitized by Google

b89089712475
b89089712475a

Digitized by Google